REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI LIABES SIDI BEL ABBES

FACULTE DES TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL & TRAVAUX PUBLICS

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : **Génie Civil**

Option : **Structures et matériaux**

Soutenue par

DJILALI Nassira

Sujet de thèse :

Etude du comportement mécanique des structures nano-composites

Soutenu le : / / devant le Jury composé de :

M. MEFTAH Sid Ahmed	Professeur	UDL SBA	Président
M. BOUSAHLA Abdelmoumen Anis	Professeur	UDL SBA	Directeur de la thèse
M. TOUNSI Abdelouahed	Professeur	UDL SBA	Co-directeur de la thèse
M. CHIKH Abdelbaki	Professeur	U. Tiaret	Examinatreur
M. HADJ MOSTEFA Adda	MCA	U. Relizane	Examinateur
M. BELABED Zakaria	Professeur	U. Naama	Examinateur

Année universitaire : 2023-2024

Bismillah

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

In The Name of Allah

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier ***ALLAH*** *le tout puissant de m'avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à terme ma formation et pourvoir réaliser ce travail de recherche.*

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire Matériaux et Hydraulique ***(LM&H)*** *de la faculté de technologie de l'université Djilali Liabes de Sidi Belabbes, sous la direction du Professeur* ***BOUSAHLA Abdelmoumen Anis****, et Professeur* ***TOUNSI Abdelouahed****.*

En premier lieu et en guise de reconnaissance, je tiens à remercier, très sincèrement et profondément, mon ***Directeur de thèse****, Monsieur* ***BOUSAHLA Abdelmoumen Anis****, Professeur auprès de l'université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes, pour m'avoir fait confiance et avoir bien voulu se lancer avec moi dans mon travail.*

Son sens élevé du devoir, le fait d'être toujours à l'écoute ainsi que sa rigueur scientifique impose l'estime et le respect. Merci pour votre aide et votre soutien. Merci pour votre disponibilité et vos conseils avisés, sans lesquels ce travail ne serait pas arrivé là où il en est aujourd'hui.

Mes remerciements vont aussi à mon ***Co-directeur de thèse****, le professeur* ***TOUNSI Abdelouahed,*** *Professeur auprès de l'université de Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant de codiriger ce travail doctoral.*

Merci pour votre son aide et votre concours dans l'aboutissement de ce travail ; et merci de m'honorer de faire partie du jury.

J'exprime aussi mes remerciements à Monsieur ***MEFTAH Sid ahmed,*** *Professeur agrégé auprès de l'Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes pour avoir accepté de* ***présider mon jury de thèse.***

Je remercie ensuite l'ensemble des membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir étudier mon travail et d'avoir accepté d'examiner cette thèse :

Monsieur ***CHEIKH Abdelbaki****, professeur auprès de l'Université de Tiaret.*
Monsieur ***HADJ MOSTEFA Adda****, Maître de conférences auprès de l'Université de Relizane.*
Monsieur ***BELABED Zakaria****, professeur auprès de l'Université de Naama.*

Aussi je n'oublie pas de remercier les membres du laboratoire ***LM&H****, qui m'ont offert un environnement de travail sain et motivant.*
Je tiens à remercier tout particulièrement ***ma famille et mes amis proches****.*
Mon père *qui a toujours su être là dans tous les moments, les bons comme les difficiles ; son soutien et sa générosité constante ont été fondamentaux, sa droiture et sa conduite ont toujours été un modèle pour moi.*
Ma mère *qui a toujours su m'écouter ; sa douceur, sa tendresse et sa volonté ont toujours mérité mon plus profond respect.*
Enfin, j'adresse toute ma gratitude à ***mes frères et sœurs****, pour leur soutien moral et matériel, sans qui ce travail n'aurait, sans doute, jamais abouti.*

Dédicaces

A mes chers parents.

Quoi que je dise ou que je fasse, je n'arrivai jamais à vous remercier comme il se doit. C'est grâce à vos encouragements, vos bienveillances et votre présence à mes côtés, que j'ai réussi ce respectueux parcours.

Je souhaite que vous soyez fière de moi, et que j'ai pu répondre aux espoirs que vous avez fondé en moi.

A mes Princes, Mes deux fils.

Mohamed et Anass rien n'est plus beau sur terre que de les voir sourire.

A mes chers frères et sœurs.

Merci pour vos soutiens moraux, vos confiances et vos conseils précieux, qui m'ont aidé dans les moments difficiles.

Je vous souhaite le bonheur et la réussite dans vos vies.

A toute ma famille et mes amis

À travers ses lignes je ne peux pas vous décrire tous mes sentiments d'amour, le seul mot que je peux dire est merci, vraiment merci beaucoup à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce mémoire.

Résumé

Dans la présente étude, le comportement mécanique des structures nano composites a été analysé sur la base de la théorie des plaques de déformation par cisaillement d'ordre supérieur (HSDT).

Au terme de ce travail, une synthèse bibliographique sur les nanotubes de carbone et les matériaux nano composites est présentée tout en montrant leurs importances. Les différentes théories des plaques sont rappelées. Une théorie est proposée pour l'analyse du comportement non linéaire de flexion cylindrique d'une plaque fonctionnellement graduée dans un environnement thermique. La formulation utilisée prend en considération l'effet de cisaillement transversal sans inclure le facteur de correction qui est exigé dans la théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT) en utilisant une simple intégrale. Les plaques considérées sont renforcées dans la matrice polymère par des nanotubes de carbone à paroi simple (SWCNT) avec deux types de distributions de matériau de renforcement qui sont uniformément (UD-CNT) et fonctionnellement graduées (FG-CNT). Les propriétés matérielles des plaques composites renforcées par des nanotubes de carbone (CNTRC) sont supposées dépendre de la température et prédis en utilisant la loi de mélange. Les relations déformation-déplacement de Von Karman sont utilisées pour étudier la non-linéarité géométrique. En outre, les effets des différents paramètres de la plaque tels que la géométrie, la fraction volumique des nanotubes de carbone, la température et la distribution des renforts, sur la réponse en flexion cylindrique non linéaire sont présentés et discutés. Pour montrer la précision de la théorie utilisée, les résultats trouvés sont comparés avec ceux obtenus par des autres études existantes dans la littérature.

Mots- clés : Plaque (CNTRC) ; flexion cylindrique ; non linéarité géométrique ; théorie HSDT ; environnement thermique.

Abstract

In the present study, the mechanical behavior of nanocomposite structures was analyzed based on the theory of higher-order shear deformation (HSDT) plates.

At the end of this work, a bibliographical synthesis on carbon nanotubes and nanocomposite materials is presented while showing their importance. The different plate theories are recalled. A theory is proposed for the analysis of the nonlinear behavior of cylindrical bending of a functionally graded plate in a thermal environment. The formulation used takes into consideration the transverse shear effect without including the correction factor which is required in high order shear deformation theory (HSDT) using a simple integral. The considered plates are reinforced in the polymer matrix by single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) with two types of reinforcement material distributions which are uniformly (UD-CNT) and functionally graded (FG-CNT). The material properties of carbon nanotube reinforced composite plates (CNTRC) are assumed to be temperature dependent and predicted using the mixing law. Von Karman strain-displacement relations are used to study geometric nonlinearity. Additionally, the effects of different plate parameters such as geometry, carbon nanotube volume fraction, temperature, and reinforcement distribution, on the nonlinear cylindrical bending response are presented and discussed. To show the accuracy of the theory used, the results found are compared with those obtained by other existing studies in the literature.

Keywords: Plate (CNTRC); cylindrical bending; geometric nonlinearity; HSDT theory; thermal environment.

ملخص

في هذه الدراسة، تم تحليل السلوك الميكانيكي لهياكل المركبات النانوية بناءً على نظرية لوحات تشوه القص ذات الترتيب العالي.(HSDT).

خلال هذا العمل، يتم تقديم مفاهيم حول الأنابيب النانوية الكربونية والمواد المركبة النانوية مع إظهار أهميتها. يتم التطرق لعدة نظريات المتعلقة بتشوه الصفائح ، حيث تم اقتراح نظرية لتحليل السلوك اللاخطي للانحناء الأسطواني للوحة متدرجة وظيفيًا في بيئة حرارية بأخذ بعين الاعتبار تأثير القص الشاقولي دون استخدام عامل التصحيح المطلوب في نظرية تشوه القص عالي الترتيب (HSDT) التي تعتمد على تكامل بسيط. يتم تقوية الألواح المدروسة في مصفوفة البوليمر بواسطة الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار (SWCNTs) مع نوعين من توزيعات مواد التعزيز التي تكون موحدة (UD-CNT) ومتدرجة وظيفيًا (FG-CNT). يُفترض أن تكون خصائص المواد للألواح المركبة المقواة بأنابيب الكربون النانوية مرتبطة بدرجة الحرارة المحيط باستخدام قانون الخلط. تُستخدم علاقات تشوه-إزاحة لفون كارمان لدراسة اللاخطية الهندسية. بالإضافة إلى ذلك، تم عرض ومناقشة تأثيرات معاملات مختلفة متعلقة بالصفائح مثل الهندسة ،النسبة الحجمية للأنابيب النانوية الكربونية ، درجة الحرارة ،و توزيع التعزيزCNTs ، على استجابة الانحناء الأسطواني غير الخطي. لإظهار دقة النظرية المستخدمة، تمت مقارنة النتائج الموجودة مع تلك التي تم الحصول عليها من خلال الدراسات الأخرى الموجودة في الأدبيات.

الكلمات الرئيسية: لوحة (CNTRC) ؛ الانحناء الأسطواني؛ اللاخطية الهندسية؛ نظرية HSDT؛ البيئة الحرارية.

Liste des figures

Figure I.1 : Matériau composite **06**

Figure I.2 : Déffirentes familles des matrices **10**

Figure I.3 : Différents morphologie du renfort **12**

Figure I.4 : Vue en coupe d'une particule de noir de carbone **14**

Figure I.5 : Graphène à partir du graphite **16**

Figure II.1 : Représentation de la structure atomique du graphite **19**

Figure II.2 : Structure de diamant **20**

Figure II.3 : Représentation schématique des différentes formes des fullerènes les plus connus **21**

Figure II.4 : Du graphène nanotube de carbone **22**

Figure II.5 : Différents types de nanotube de carbone SWNT **24**

Figure II.6 : Enroulement d'un feuillet de graphène pour former un nanotube **24**

Figure II.7 : Structure schématique d'un MWNT **25**

Figure II.8 : Modèles des nanotubes (MWCNTs). (a) Feuillets de graphène arrangés en cylindres concentriques ; (b) Feuillet de graphène unique enroulé en spirale **26**

Figure II.9 : Production de nanotubes de carbone par la méthode de l'arc électrique **27**

Figure II.10 : Schéma du dispositif de synthèse de CNTs par ablation laser **27**

Figure II.11 : schéma descriptif d'un réacteur CVD pour la croissance des CNTs **28**

Figure II.12 : Schéma descriptif de la production de nanotubes par la méthode HiPCo **29**

Figure II.13: Propriétés électroniques des nanotubes de carbone monocouches en fonction de leurs indices de chiralité (n, m) **33**

Figure II.14 : Nano fils encapsulés : **a.** Fe encapsulé dans un MWNT
b. C82 encapsulé dans un SWNT **34**

Figure II.15 : Défauts pentagonaux et heptagonaux de CNT **36**

Figure II.16 : Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité **37**

Figure II.17 : Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions **37**

Figure II.18: Prévisions d'évolution du marché des nanotubes de carbone de 2021 à 2028 **39**

Figure II.19 : Représentation schématique d'un polymère thermoplastique **42**

Figure II.20 : Représentation schématique d'un polymère thermodurcissable **42**

Figure II.21 : Représentation schématique d'un polymère élastomère **43**

Figure II.22: Schéma d'une structure amorphe **44**

Figure II.23 : Structure d'un polymère semi-cristallin **44**

Figure II.24 : Procédés d'élaboration des nano composites **46**

Figure II.25: Différents type de renfort en fibre de carbone. **51**

Figure II.26: Collage de tissus en carbone au niveau de la jonction entre deux poutres et un poteau **52**

Figure II.27: Renforcement de la sous-face d'une poutre de pont à l'aide de lamelles en carbone **52**

Figure II.28: Mèches carbone et leur mise en œuvre **53**

Figure II.29: Vue de Marina Bay Sands, Singapore (utilisé les nano renforts en carbone) **53**

Figure II.30 : Vue aériennes de pont westgate à Melbourne (Australie) **54**

Figure II.31: Exemple de chantier de rénovation de stade Santiago Bernabéu (Real Madrid) **54**

Figure II.32: Fabrication des poteaux géants et des renforts en fibre de carbone de la passerelle MATAF en Arabie Saoudite **55**

Figure II.33: La Symphony House de Philadelphie utilisé des panneaux muraux renforcés par une grille en fibre de carbone. **55**

Figure III.1 : Illustration de la plaque de Love-Kirchhoff **59**

Figure III.2 : Illustration de la plaque de Reissner-Mindlin **60**

Figure III.3: Comparaison entre la théorie HSDT, FSDT et CPT **62**

Figure III.4 : Relation entre les charges appliquées et les déplacements induits **66**

Figure IV.1 : Géométrie des plaques composites renforcées par des nanotubes de carbone **71**

Figure V.1 : structure moléculaire de polymère PmPV **79**

Figure V.2 : SWCNT de type armchair (10,10) **79**

Figure V.3 : Variation de la flèche centrale de la plaque FG et UD-CNTRC en fonction de la charge uniforme q **81**

Figure V.4 : Variation de la déflexion centrale adimensionnelle de la plaque CNTRC en fonction de la charge transversale pour différentes fractions volumiques **82**

Figure V.5 : Variation de la déflexion centrale adimensionnelle de la plaque CNTRC en fonction de la charge transversale et de différents types d'analyse **83**

Figure V.6 : Effets du rapport longueur/épaisseur de plaque a/h sur le comportement en flexion non linéaire des plaques CNTRC sous charge transversale **84**

Figure V.7 : Effets de la fraction volumique des nanotubes sur la contrainte axiale à mi-portée de la plaque CNTRC **85**

Figure V.8 : Effets du rapport largeur/épaisseur a/h sur la contrainte axiale à mi-portée des plaques CNTRC en analyse non linéaire **85**

Figure V.9 : Effets des changements de température sur la contrainte axiale à mi-portée des plaques CNTRC **86**

Liste des tableaux

Tableau I.1: Dimensions caractéristiques des principaux nano renforts **13**

Tableau II.1: Avantages et inconvénients des différentes synthèses de CNTs **30**

Tableau III.1: Différents modèles des théories de déformation **64**

Tableau V.1: Propriétés des matériaux dépendant de la température pour SWCNT (10, 10) (L=9.26 nm ; R= 0.68 nm ; h= 0.067 nm ; $\nu_{12}^{CN} = 0.175$) **80**

Tableau V.2: Comparaison des modules de Young des composites PmPV/CNT renforcés par des tubes (10,10) sous T= 300 K **80**

Table des matières

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des notations et symboles

Introduction générale **01**

Chapitre I : Généralités sur les nano-composites

I.1. Introduction **06**

I.2. Définition des nano-composites **07**

I.3. Classification des nano-composites **07**

I.3.1. Classification des nano-composites selon la nature de la matrice **07**

I.3.1.1. Nano-composites à matrice organique **07**

I.3.1.1.a. Nano-composites à matrices thermoplastiques **08**

I.3.1.1.b. Nano-composites à matrices thermodurcissables **08**

I.3.1.2. Nano-composites à matrice métallique **09**

I.3.1.3. Nano-composites à matrice céramique **09**

I.3.2. Classification des nano-composites selon le type du renfort **10**

I.3.2.1. Nano-composites à base de nanotubes de carbone **10**

I.3.2.2. Nano-composites à base de nanoparticules **11**

I.3.2.3. Nano-composites à base d'argile **11**

I.4. Nano renforts (nano charges) **12**

I.4.1. Classification des nano-renforts **12**

I.4.1.1. Classification selon leur géométrie **12**

I.4.1.1.1. Renforts de type 1D (plaques/lamelles/feuillets) **12**

I.4.1.1.2. Renforts de type 2D (nanotubes et nano fibres) **13**

I.4.1.1.3. Renforts de type 3D (nanoparticules sphériques) **13**

I.4.1.2. Classification selon leur nature **14**

I.4.1.2.1. Noir de carbone **14**

I.4.1.2.2. Poudres métalliques **15**
I.4.1.2.3. Feuillet Argile **15**
I.4.1.2.4. Graphène **16**
I.4.1.2.5. Nano-fibres de carbone (Nanotubes de carbone) **17**
I.4.1.2.6. Nano-fibrilles de cellulose **17**
I.5. Conclusion **17**

Chapitre II : Généralités sur les nano-composites à base de (polymères/CNT)

II.1. Introduction **18**
II.2. Carbone **18**
II.2.1. Les formes traditionnelles du carbone **19**
II.2.1.1. Le graphite **19**
I.2.1.2. Le diamant **19**
II.2.1.3. Les carbones "mal organisés" **20**
II.2.2. Les nouvelles formes du carbone **20**
II.2.2.1. Fullerènes **20**
II.2.2.2. Nanotubes de carbones **21**
II.3. Généralités sur les nanotubes de carbone (CNT) **21**
II.3.1. Définition **21**
II.3.2. Découverte des nanotubes de carbone **22**
II.3.3. Structures des nanotubes de carbone **23**
II.3.3. 1. Nanotubes de carbone mono feuillet, SWNTs **23**
II.3.3. 2. Nanotubes de carbone multifeuillet, MWNTs **25**
II.3.4. Synthèse des nanotubes **25**
II.3.4.1 Méthode de l'arc électrique **26**
II.3.4.2. Méthode d'ablation laser **27**
II.3.4.3. Méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) **28**
II.3.4.4. Décomposition catalytique (HiPCO) **29**
II.3.5. Propriétés des nanotubes de carbone **31**
II.3.5.1. Propriétés mécaniques **31**
II.3.5.2. Propriétés thermiques **32**
II.3.5.3. Propriétés électriques **32**

II.3.5.4. Propriétés de capillarité **34**
II.3.5.5. Propriétés optiques **34**
II.3.6. Purification des nanotubes **35**
II.3.6.1. Méthodes chimiques **35**
II.3.6.2. Méthodes physiques **35**
II.3.7. Défauts des nanotubes de carbone **36**
II.3.8. Risques et préventions **37**
II.3.9. Producteurs sur le marché **38**
II.4. Généralités sur les polymères **40**
II.4.1. Définition des polymères **40**
II.4.2. Classification des polymères **40**
II.4.2.1. Suivant l'origine **40**
II.4.2.1.1. Polymères naturels **40**
II.4.2.1.2. Polymères artificiels **40**
II.4.2.1.3. Polymères synthétiques **40**
II.4.2.2. Suivant la structure chimique **40**
II.4.2.2.1. Homopolymères **41**
II.4.2.2.2. Copolymères **41**
II.4.2.3. Suivant le comportement thermique **41**
II.4.2.3.1. Thermoplastiques **41**
II.4.2.3.2. Thermodurcissables **42**
II.4.2.3.3. Elastomères **42**
II.4.3. Structures moléculaires des polymères **43**
II.4.3.1. Structures amorphes **43**
II.4.3.2. Structures semi-cristallines **44**
II.5. Nano composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère) **44**
II.5.1. Procédés d'élaboration des nano composites (CNT/polymère) **45**
II.5.1.1. Polymérisation in situ **45**
II.5.1. 2. Mélange en solution **45**
II.5.1.3. Mélange à l'état fondu **46**
II.5.2. Propriétés des nano composites (CNT/polymère) **46**
II.5.2.1. Propriétés mécaniques des nano composites (CNT/polymère) **46**
II.5.2.2. Propriétés thermiques des nano composites (CNT/polymère) **47**

II.5.2.3. Propriétés électriques des nano composites (CNT/polymère) **48**
II.6. Application des nano composites dans le domaine de Génie civil **49**
II.7. Conclusion **55**

Chapitre III : Théories et propriétés des plaques nano-composites

III.1. Introduction **56**
III.2. Définition des plaques **56**
III.3. Différentes théories de déformation des plaques monocouches **58**
III.3.1. Théorie classique des plaques minces de Love-Kirchhoff **58**
III.3.2. Théorie de déformation de cisaillement du premier ordre **60**
III.3.3. Théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé **61**
III.3.4. Théorie raffinée des plaques RPT **62**
III.3.5. Théorie de déformation des plaques Quasi-3D **63**
III.4. Différents modèles des théories de déformation **64**
III.5. Analyse non linéaire des plaques **65**
III.5.1. Introduction **65**
III.5.2. Différents types de comportement non linéaire **67**
III.5.2.1. Non linéarité géométrique **67**
III.5.2.2. Non linéarité matérielles **68**
III.5.2.3. Non linéarité cinématique **68**
III.5.2.4. Non linéarité de force **69**
III.6. Conclusion **69**

Chapitre IV : Etude du comportement non linéaire des plaques FG-CNTRS

IV.1. Introduction **70**
IV.2. Formulations théoriques **70**
IV.2.1. Propriétés matérielles à gradient de propriétés des plaques CNTRC **70**
IV.2.2. Relations Déformation-Déplacement **72**
IV.2.3. Relations constitutives **74**
IV.2.4. Équations de mouvement **74**
IV.3. Conclusion **76**

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Introduction **78**
V.2. Analyse des résultats **78**

V.3. Conclusion **86**

Conclusion et perspectives **88**

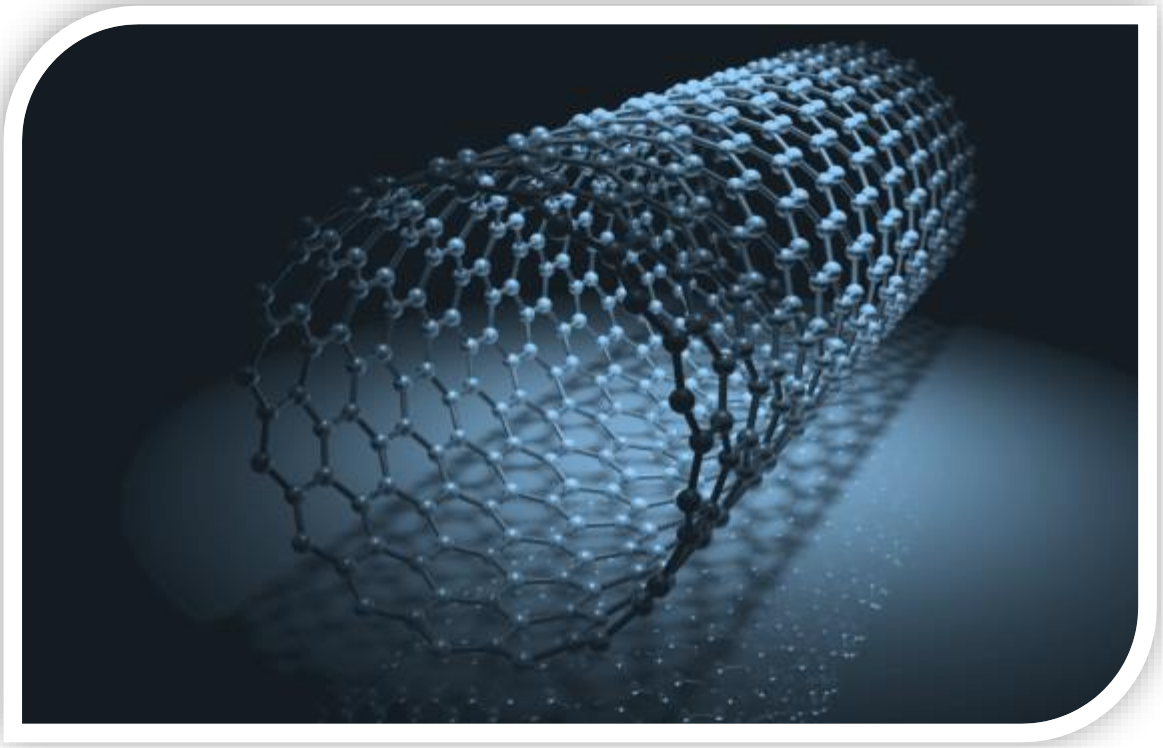
Références bibliographiques

Liste des notations et symboles

A	Longueur de la plaque
B	Largeur de la plaque
H	Epaisseur de la plaque
u_0, v_0, w_0	Composantes du champ de déplacement sur le plan moyen de la plaque
u, v, w	Déplacements dans les directions x, y et z
Θ	Rotation
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	Rotations autour des axes x, y et z
A'	Coefficient adopté selon le type de solution
k_1	Coefficient dépend de la géométrie
$f(z)$	Fonction de gauchissement (fonction de cisaillement transverse)
$g(z)$	Dérivée de la fonction de cisaillement
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Composants des contraintes normales
τ_{xz}, τ_{yz}	Composants des contraintes tangentielles
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Déformations dans la direction x, y et z
γ_{xz}, γ_{yz}	Déformations de cisaillement
$\delta u, \delta v, \delta w$	Champ virtuel de déplacement
Π	Energie totale
U	Energie de déformation
V	Energie potentielle
$\delta\varepsilon_x, \delta\varepsilon_y, \delta\varepsilon_z$	Champ de déformation longitudinal virtuel
$\delta\gamma_{xz}, \delta\gamma_{yz}$	Champ de déformation transversal virtuel
Q	Charge transversale
T	Chargement thermique
N_x, M_x, S_x, Q_{xz}	Résultantes de contrainte (effort normal, moment fléchissant, effort tranchant)
N^T, M^T et S^T	Charges thermiques équivalentes

i, j	Nombres naturels
$(A_{11}, B_{11}, D_{11}, B_{11}^s, D_{11}^s, H_{11}^s, A_{55}^s)$	Composantes de la rigidité
E_{11}^{CN}, E_{22}^{CN}	Modules de Young du nanotube de carbone
G_{12}^{CN}	Module de cisaillement du nanotube de carbone
$\alpha_{11}^{CN}, \alpha_{22}^{CN}$	Coefficients de dilatation thermique du nanotube de carbone
E^m	Modules de Young de la matrice
G^m	Module de cisaillement de la matrice
α^m	Coefficients de dilatation thermique de la matrice
ν_{12}^{CN}	Coefficients de poisson du nanotube de carbone
ν^m	Coefficients de poisson de la matrice
η_j	Paramètres d'efficacité du CNT
V_{CN}, V_{CN}^*	Fractions volumiques des nanotubes de carbone
V_m	Fraction volumique de la matrice
W_{CN}	Fraction massique du nanotube de carbone
ρ_{CN}	Densité de nanotube de carbone
ρ_m	Densité de la matrice

INTRODUCTION GÉNÉRALE



Introduction générale

La recherche de performances technique des matériaux spécifiques au besoin technologique a motivé les concepteurs pour rechercher des solutions scientifiques pouvant relever les défis imposés par les problèmes rencontrés en technologie. Pour cela, ils ont développé des matériaux renforcés à hétérogénéité particulières appelées matériaux composites. La croissance rapide d'applications des matériaux composites au cours de ces dernières années a fait naître beaucoup d'optimisme. Donc, les structures composites occupent actuellement une place considérable dans tous les secteurs industriels tels que les structures de génie civil, l'industrie aéronautique et aérospatiale, le transport terrestre et maritime, les articles et matériels de sport etc....

Dans le domaine de génie civil, les matériaux composites présentent de nombreux avantages par rapport aux matériaux traditionnels tels que le béton, l'acier ou le bois, notamment leur légèreté, leur résistance à la corrosion et leur durabilité notamment pour le renforcement et la réhabilitation d'éléments structuraux en béton armé, tels que les poutres, les dalles, les colonnes et les murs.

Récemment, des matériaux composites de taille nanométrique connus sous le nom de nanomatériaux, avec des composants plus petits et des propriétés plus fortes, ont attiré beaucoup d'attention dans de nombreuses applications d'ingénierie où il est possible d'adapter les structures des matériaux à des échelles extrêmement petites pour obtenir des propriétés spécifiques et des avantages considérables. Grâce à la nanotechnologie, les matériaux peuvent être rendus plus résistants, plus légers, plus durables, plus réactifs, avec l'introduction et l'utilisation, au cours des dernières décennies, des nanotubes de carbone.

Depuis leurs découvertes par Iijima ([*Iijima, 1991*], [*Iijima, 1993*]), ces nanotubes de carbone sont devenus une nouvelle classe de fibres de renforcement dans les composés de matrice polymère qui ont donné un grand intérêt de recherche dans le domaine de l'ingénierie des matériaux en raison de leurs propriétés électroniques, thermiques et mécaniques excellentes ([*Dai, 1996*], [*Dresselhaus, 2001*], [*Bachtold, 2001*], [*Hajmohammad, 2018*], et [*Kiani, 2019*]).

L'introduction de ces nano charges dans les matrices polymères pour renforcer les matériaux composites, s'est alors développée et étudiée par de nombreux chercheurs comme [*Thostenson, 2001*], [*Lau, 2004*] et [*Esawi, 2007*].

Des effets de renforcements mécaniques ont été observés dans des nano composites, en particuliers sur leurs propriétés telles que « le module de Young », « le coefficient de Poisson », « le module d'élasticité en cisaillement », «la densité du matériau » et « les dilatations thermiques et d'humidité » dans divers domaines.

Néanmoins, l'utilisation de ces nano charges comme renforcement dans les composites restent encore assez méconnus et nécessitent des approfondissements et des améliorations.

De nombreuses recherches sont ainsi menées sur les composites renforcés par nanotubes de carbone (CNTRC) pour comprendre les phénomènes régissant les propriétés des matériaux grâce à de nouvelles recherches et applications, pour obtenir une amélioration par l'ajout de petites quantités de nanotubes de carbone qui peuvent considérablement perfectionner les caractéristiques mécaniques, électriques et thermiques des composites polymères ([*Nguyen,2017*], [*Sweeney , 2017*], [*Zhong , 2018*], [*Jalal, 2018*],[*Rezaiee-Pajand, 2019*], [*Tayeb , 2020*], [*Motezaker , 2020*], [*Khazaeia ,2020*]).

En conséquence, il est nécessaire d'observer la réponse globale des CNTRC dans un élément structurel réel. Kiani [*Kiani, 2016*] a étudié la réponse au flambage par cisaillement de plaques rectangulaires composites renforcées par des nanotubes de carbone (CNTRC) dans un environnement thermique.

En 2017, ce chercheur [*Kiani, 2017*] a présenté une température critique de flambement de plaques obliques constituées d'une matrice polymère/CNT à paroi unique (SWCNT). Le comportement en flexion de la plaque composite renforcée de nanotubes de carbone fonctionnellement gradués (FG-CNTRC) est étudié sous la charge thermomécanique combinée a été présenté par Mehar et Panda [*Mehar, 2017*].

Mehar et al. [*Mehar, 2020*] ont utilisé la FEM pour calculer les réponses modales d'une plaque sandwich renforcée par des nanotubes de carbone à parois multiples(MWNT) dans un environnement à température élevée.

En 2020, Timesli [*Timesli, 2020*] a étudié la stabilité d'une coque cylindrique en béton armé par des nanotubes de carbone à paroi unique (SWCNT) intégrée dans une fondation élastique en utilisant la théorie des coques cylindriques de Donnell. Zerrouki [*Zerrouki, 2020*] a étudié l'effet de la distribution linéaire et non linéaire de la fraction volumique des nanotubes de

carbone dans les plaques fonctionnellement graduées FG-CNTRC, sur le flambement critique, en utilisant des théories de déformation par cisaillement d'ordre supérieur (HSDT).

Boulal et al. [*Boulal, 2020*] ont étudié le comportement de flambage des plaques composites renforcées par des nanotubes de carbone à paroi simple avec quatre types de distributions de matériau de renforcement alignés uniaxialement et reposant sur une fondation élastique modèle de Kerr. Tayeb et al. [*Tayeb, 2020*] ont présenté une analyse de la charge critique de flambage d'une plaque en polymère renforcé avec une distribution parabolique de nanotubes de carbone. Plusieurs études ont été rapportées sur la coque composite FG-CNT à double courbure. L'analyse vibratoire ainsi que les effets de l'environnement thermique et de la fondation élastique de la coque composite FG-CNT à double courbure ont été étudiés par Ghassabi et al. [*Ghassabi, 2020*]. Ils ont présenté une stratégie de solution basée sur la technique du vecteur d'état pour étudier les performances vibroacoustiques des coques épaisses composites renforcées de nanotubes de carbone (CNT) à double courbure en utilisant la théorie tridimensionnelle. Rahmatnezhad et al. [*Rahmatnezhad, 2021*] ont présenté pour la première fois une stratégie analytique, selon la solution en série double de Fourier, pour déterminer acoustiquement la réponse vibratoire d'une coque composite à double courbure dans un environnement thermique.

Cependant, la discontinuité des propriétés matérielles à travers l'interface des constituants du matériau composite (polymère/CNT), provoque des concentrations de contraintes sous des chargements mécaniques etthermiques, spécialement dans un environnement thermique ultra-chaud. Le chargement thermique auquel sont soumises certaines de ces structures composites et les contraintes thermiques qui en résultent, jouent un rôle très important dans la ruine de ces structures [*Stones, 1986*]. Il est donc essentiel de disposer de moyens de calcul, les plus efficaces et précis possible, qui respectent les lois de la physique, afin étudier l'influence du chargement thermique sur le comportement mécanique des structures les plaques en matériaux à gradient de propriétés et en déduire l'évolution des déplacements, des déformations et les contraintes normales et tangentielles thermo élastiques liées à un chargement thermique donné en chaque point de la structure.

Bien que plusieurs études sur le comportement linéaire des nano composites ont été faites, basées sur diverses théories de déformations, des études sont rarement trouvées dans les revues de littérature pour le comportement non linéaire des composites renforcés de nanotubes de carbone (CNTRC). Le modèle linéaire modélise des petits déplacements et se révèle insuffisant pour décrire la flexion forte d'une plaque élastique. C'est pour prendre en

compte les non-linéarités géométriques en flexion cylindrique induites par les déplacements modérés que l'ingénieur hongrois Von Karman proposa en 1910 [*Von Karman, 1910*] un modèle que nous allons utiliser par la suite de notre travail.

En raison de l'importance de ce sujet, plusieurs travaux ont été menés pour explorer l'effet de non linéarité géométrique sur le comportement mécanique des nano composites, par exemple :
Mars et al. [*Mars, 2017*] ont présenté une analyse géométriquement non linéaire des coques en matériau fonctionnellement gradué (FGM) à l'aide du logiciel Abaqus.

Zghal et al. [*Zghal, 2018*] ont étudié le comportement de flexion non linéaire de structures coque renforcées par des nanotubes de carbone fonctionnellement gradué (FG-CNTRC). Mallek et al. [*Mallek, 2019*] ont analysé les comportements de grande déformation géométriquement non linéaires des coques renforcées par des nanotubes de carbone (CNTRC).Bakhti et al [*Bakhti, 2013*] ont étudié le comportement non linéaire de la flexion cylindrique des plaques FG nano composites renforcées par SWCNTs en utilisant une théorie raffinée efficace et simple. Kaci et al [*Kaci, 2012*] ont étudié la flexion cylindrique non linéaire des plaques FG nanocomposites simplement appuyées renforcés par SWCNTs.

L'objectif de ce travail est d'utiliser une théorie de déformation par cisaillement d'ordre supérieur (HSDT) des plaques nano composites renforcées par des SWCNT et soumises à un chargement de pression ; en impliquant une intégrale simple pour l'étude de leur flexion cylindrique non linéaire avec de faibles fractions volumiques de nanotubes (FG-CNTRC).
Le renforcement SWCNT est soit uniformément réparti (désigné par UD) soit fonctionnellement gradué dans le sens de l'épaisseur (désigné par FG). Les équations gouvernantes sont basées sur l'intégrale HSDT avec une non-linéarité géomértique de type Von-Kármán incluant les effets thermiques. Une approche variationnelle basant sur la méthode de Ritz est utilisée pour résoudre les problèmes de l'analyse de la grande flexion cylindrique des plaques (FG-CNTRC) dans un environnement thermique. Les illustrations numériques ci-après montrent la réponse de flexion non linéaire des plaques composites renforcées de nanotubes de carbone à gradient fonctionnel (FG-CNTCR) soumises à une charge transversale dans différents ensembles de conditions environnementales.

Pour atteindre nos objectifs, ce travail de thèse s'articule autour de cinq chapitres, d'une introduction générale et d'une conclusion.

Le premier chapitre présentera une description générale sur les matériaux nano composites, leurs classifications, leurs propriétés.

Dans **le deuxième chapitre**, nous présenterons les nano composites à base des polymères et nanotubes de carbone, leurs propriétés, les principales techniques de leur élaboration, certaines de leurs caractéristiques et les domaines de leurs utilisations.

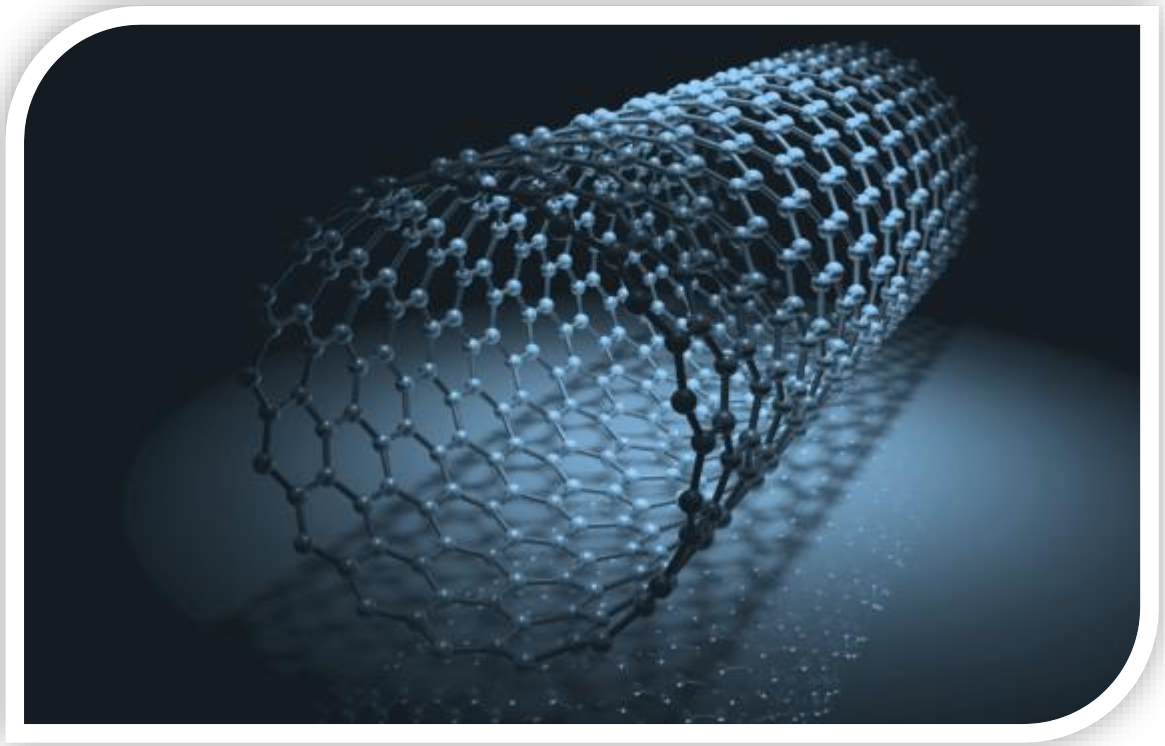
Le troisième chapitre nous passerons en revue, première partie, les différents modèles sur les théories des plaques développées dans la littérature permettant de calculer et d'obtenir des résultats relatifs à l'étude du comportement des plaques composites avancées sous chargements. La deuxième partie sera consacrée à définir l'analyse non linéaire et leurs utilisations.

Le quatrième chapitre sera consacré à l'étude du comportement non linéaire en flexion cylindrique de plaques renforcées par des nanotubes de carbone sous chargement et de l'effet de la température sur leurs comportements mécaniques en utilisant une théorie basée sur l'intégrale HSDT.

Le cinquième chapitre présentera les résultats numériques obtenus. Ils seront comparés avec d'autres résultats déjà obtenus par d'autres auteurs.
A la fin de ce manuscrit, la conclusion rappellera les résultats les plus marquants de ce travail et proposera des perspectives envisagées pour des futurs travaux, suivie d'une liste de références bibliographiques, ayant servis pour base à la rédaction du présent rapport.

CHAPITRE I :

GÉNÉRALITÉS SUR LES NANO-COMPOSITES



I. Généralités sur les nano-composites

I.1. Introduction

Avant de définir les nano composites, rappelons ce qu'est un matériau composite. Un composite est un matériau issu de l'assemblage d'au moins deux matériaux distincts (organiques et inorganiques) constitué de deux phases (ou plus) non miscibles ayant des propriétés et des rôles différents ; l'une continue appelée matrice et l'autre discontinue, appelée renfort (voir la figure I.1). Cet assemblage se fait généralement à l'échelle des constituants (échelle macroscopique ou microscopique). Les propriétés des matériaux composites sont déterminées à partir des caractéristiques de leurs constituants : fraction volumique, orientation, distribution spatiale, géométrie, propriétés physiques, qualité de l'adhésion inter-faciale des différents constituants, etc. La recherche actuelle est essentiellement centrée sur les nanotechnologies, plus particulièrement sur les nano composite de carbone qui sont de plus en plus présents dans de nombreux domaines d'application tels que l'automobile, l'aéronautique, le sport, le génie civil et les équipements industriels.

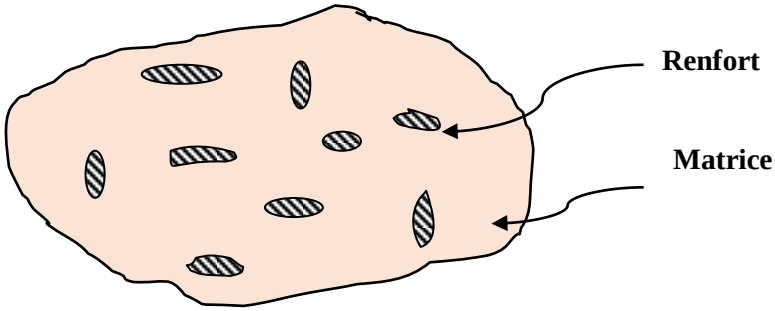


Figure I.1 : Matériau composite

Dans ce chapitre, nous allons faire un tour sur les nano-composites, notamment sur les principaux constituants, les différentes classifications, la structuration des charges dans la matrice, la conformation sur leurs propriétés mécaniques. Nous nous intéresserons également à l'évolution de la structure et de la conformation sous déformation de forte amplitude quand elles ont été mesurées. L'objectif de ce chapitre est de rappeler alors les notions de base sur les nano-composites et ainsi de positionner notre étude dans ce contexte général.

I.2. Définition des nano-composites

Les nano composites sont composés d'une matrice contenant des charges jouant le rôle des renforts rigides sous la forme des particules organiques et non-organiques, des lamelles, des fibres ou des tubes. La différence par rapport aux matériaux composites classiques provient du fait que les charges (les renforts) possèdent au moins une dimension de l'ordre du nanomètre (inférieur à 100 nm). Le pourcentage en poids (fraction massique) de nanocharges introduit peut rester très faible (de 0,5% à 5%) [*Bakhadda, 2021*].

Les nano composites (NC) présentent plusieurs intérêts par rapport aux composites classiques. Un premier intérêt réside dans la surface inter-faciale entre les nano-charges et la matrice. Pour un poids donné, les nanoparticules présentent une surface d'échange beaucoup plus importante que les particules de taille microscopique. Les NC ont donc des meilleures propriétés comparativement aux composites classiques : ils sont plus résistants, plus légers, plus durables et plus réactifs.

Actuellement, les travaux sur les matériaux composites de taille nanométrique sont devenus un point très important dans la recherche scientifique et ce, car les nano renforts (par exemple nanotubes de carbone) peuvent améliorer les propriétés mécaniques, électriques et thermiques des matrices.

I.3. Classification des nano-composites

Les nanocomposites peuvent être classés selon plusieures catégories comme ci-après.

I.3.1. Classification des nano-composites selon la nature de la matrice

Le rôle de la matrice est de recevoir les renforts, répartir les contraintes, apporter la tenue de la structure et donner la forme désirée au nano-composite. D'après [*Kassimi, 2010/2011***]**, les nano-composites peuvent classés selon la nature de la matrice comme :

- ✓ Les composites à matrice organique ou polymère (CMP) ;
- ✓ Les composites à matrice métallique (CMM) ;
- ✓ Les composites à matrice céramique (CMC).

I.3.1.1. Nano-composites à matrice organique

Les matériaux nano-composites à matrice organique, nommés aussi par des nano composites à matrice polymère, sont sûrement les plus développés du fait de l'importance commerciale de ces derniers et de la maîtrise (coût et savoir-faire) de nombreux processus de fabrication. Ils ne peuvent être utilisés que dans un domaine de températures ne dépassant pas 200 à 300 °C [*Lasmi, 2014*].

L'addition de nanocharges dans la matrice de polymère entraîne des améliorations significatives dans les propriétés. Ces incréments sont régulées par une grande multitude de facteurs, tels que, par exemple, par la morphologie et la taille de la nanostructure, fonctionnalisation de surface, le degré de dispersion dans la matrice polymère, et la densité de réticulation du polymère de matrice ([Camargo, 2009], [Paul,2008], [Sabzevari, 2016]). Ces matériaux, contenant des nano charges carboniques, forment la plus grande famille de nanocomposites à matrice polymère dû à leurs propriétés spécifiques qui peuvent être atteintes à des faibles pourcentages de nano charges. C'est dans ce contexte scientifique que ce travail a été basé.

Ces matrices se subdivisent en deux groupes : Les matrices thermoplastiques et les matrices thermodurcissables.

I.3.1.1.a. Nano-composites à matrices thermoplastiques

L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication. Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Cependant, ils possèdent la propriété de pouvoir être mis en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement successifs. Ils peuvent donc être récupérés et facilement recyclés [*Zidour, 2012*].

Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : Polyamide (PA), Polytéréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT), Polycarbonate (PC), Polysulfure de phénylène (PPS), Polyoxyméthylène (POM), Polysulfore (PSU et PPS), Polypropylène (PP), Polyamide-imide (PAI), Polyéther-imide (PEI), Polyéther-sulfone (PES), Polyéther-éther-cétone (PEEK).

I.3.1.1.b. Nano-composites à matrices thermodurcissables

Contrairement aux composites à matrices thermoplastiques, les composites à matrices thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une fois. En effet, après polymérisation par apport de chaleur en présence d'un catalyseur, ces résines conduisent à un réseau très réticulé qui ne peut être détruit que par un apport important de chaleur. Ainsi, ils possèdent des propriétés mécaniques et thermiques plus élevées que les composites à matrices thermoplastiques.

Ces polymères ne sont pas recyclables, et ce phénomène pose un problème, qui n'a pas encore de solution fiable [*Menail, 2009*].

Les principales résines thermodurcissables sont :

- **Les vinylesters :** Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.
- **Les phénoliques :** Elles se caractérisent par une bonne tenue au feu et à hautes températures. Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en oeuvre.
- **Polyimides :** Ces résines sont surtout trouvées dans les composites à hautes performances (HP) qui sont utilisés dans le domaine d'aéronautique, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures (>250°C). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre.
- **Les résines époxydes :** Les avantages des époxydes sont la tenue mécanique, thermique, chimique et fatigue, Faible retrait (1 à 2%), une excellente adhérence sur fibres et la facile mise en œuvre. L'un des inconvénients de ces résines est le prix élevé, la sensibilité à l'humidité, aux chocs et aux (UV) et le vieillissement sous la température.

I.3.1.2. Nano-composites à matrice métallique

Dans les nanocomposites à matrice métallique, la matrice est un métal (Al, Ti, Cu, Fe, W, Ag…) et les renforts les plus utilisés sont les nanoparticules des métaux. Les composites à matrice métallique encore appelés MMCs (*metal matrix composites)* sont développés grâce à la facilité et à la maîtrise des procédés de fabrication ainsi qu'à leur faible coût. Ils peuvent être utilisés jusqu'à 600˚C [*Lasmi, 2014*].

I.3.1.3. Nano-composites à matrice céramique

Les matériaux composites à matrice céramiques sont généralement fragiles. La fabrication de ces matériaux se fait par frittage de différents oxydes et matériaux inorganiques ce qui consiste en un « compactage » de ces différents composants sous haute pression et haute température (jusqu'à 1000°C). L'utilisation des céramiques est donc limitée notamment par leur ténacité à rupture, leur résistance à la fatigue et aux chocs thermiques. Pour résoudre ces problèmes, l'incorporation d'une seconde phase ductile dans la matrice céramique est une solution [*Zidour, 2012*]. Un exemple de nanocomposites à matrice céramique est celui à matrice Al2O3 renforcée par des nanoparticules de SiC [*Cantor, 2004*].

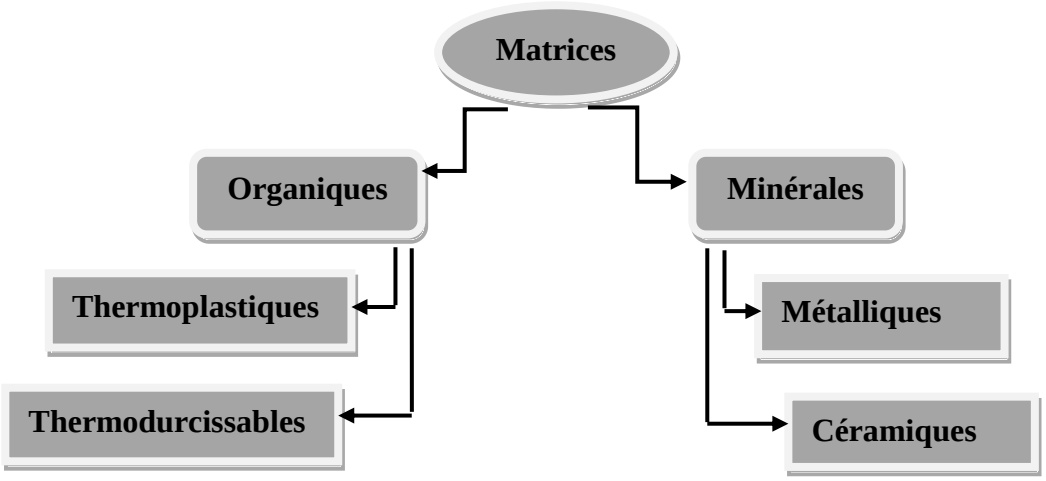


Figure I.2 : Différentes familles des matrices.

I.3.2. Classification des nano-composites selon le type du renfort

Le facteur commun entre les procédés de fabrication des différents types de nano-composites est lié à la taille des renforts qui ne sont plus micrométriques mais nanométriques : pour obtenir les propriétés requises, il faut une distribution et une dispersion homogène des renforts qui ne doivent pas s'agglomérer. Il faut donc parfois adapter les méthodes existantes ou en inventer de nouvelles méthodes qui tiennent compte de cet effet, comme le montrent les exemples ci-dessous de nano-composites classés par types de renforts.

I.3.2.1. Nano-composites à base de nanotubes de carbone

Pour la fabrication de nano-composites, les nanotubes de carbone sont principalement associés à des polymères thermodurcissables. C'est ainsi qu'en 1994, Ajayan [*Ajayan, 1994*] fut le pionnier de la fabrication de nano-composites à matrice polymère renforcée par des nanotubes de carbone afin d'améliorer les propriétés mécaniques du nano-composite. Il utilisa une résine époxy dans laquelle les nanotubes été dispersés par ultrasons. Depuis, de nombreuses avancées ont été faites, et notamment du point de vue de la dispersion des nanotubes de carbone, ou bien au niveau de l'interface matrice/renfort [*Bartholome, 2008*]. A noter que le procédé de fabrication ne doit pas endommager les nanotubes pour conserver l'intégrité de leurs propriétés notamment mécaniques. En effet, l'ajout des nanotubes de carbone dans une matrice polymère lui confère en plus de la rigidité mécanique, des augmentations significatives de conductivités électrique et thermique.

I.3.2.2. Nano-composites à base de nanoparticules

Les renforts particulaires, avec les trois dimensions nanométriques, sont généralement des billes de diamètre inférieur ou égal à 100 nm. Les principaux renforts particulaires sont le noir de carbone et la silice. Le diamètre des particules de carbone varie de 10 à 400 nm tandis que celui des particules de silice varie de 30 à 150 nm. Le noir de carbone s'utilise essentiellement dans des matrices élastomères. Les applications industrielles des nano-composites à renforts particulaires sont essentiellement les peintures et les films. Les nanoparticules permettent dans ces applications d'obtenir une bonne résistance aux solvants, l'absence de collant superficiel ainsi que, dans le cas des films, de bonnes propriétés mécaniques (résistance à l'abrasion).

I.3.2.3. Nano-composites à base d'argile

Trois types de nano-composites peuvent être obtenus avec des argiles dans une matrice polymère dépendant de la nature des constituants utilisés, y compris la matrice, les cations inorganiques et l'argile :

- Micro-composite : Le matériau présente deux phases distinctes, une organique, le polymère et une phase inorganique, les nano-charges. Dans les nano-composites, les nano-charges ont tendance à former des agrégats (on parle aussi d'amas ou de tactoïdes), dont la taille dans le cas des silicates de l'ordre du micromètre. Dans le cas de particules à feuillets, si la distance entre les feuillets, appelée distance interfoliaire, reste inchangée au cours de la mise en œuvre, le polymère ne s'insère pas dans cet espace. L'appellation nano-composite est alors abusive.
- Nano-composite intercalé : La distance interfoliaire est ici suffisante pour permettre l'insertion des chaînes de polymère dans l'espace interfoliaire appelé galerie. Cependant, les feuillets ne se séparent pas complètement. Ils restent couplés, c'est-à-dire ordonnés.
- Nano-composite exfolié : Ce sont des structures délaminées où les couches de silice sont complètement et uniformément réparties dans la matrice polymère. La délamination a pour effet de maximiser les interactions polymère/argile augmentant considérablement la surface de contact et créant les propriétés spécifiques de ce type de nano-composite.

I.4. Nano renforts (nano charges)

Dans les nano-composites, Les renforts (les charges) doivent avoir au moins une de leurs dimensions morphologiques inférieure à 100 nm.

Ils sont destinés à modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface, et éventuellement, à diminuer le prix de revient du produit final. Ils varient beaucoup selon leur prix, leur composition et leurs caractéristiques physiques et chimiques.

I.4.1. Classification des nano-renforts

I.4.1.1. Classification selon leur géométrie

Les renforts peuvent être classés en trois catégories en fonction de leur géométrie [*Marquis, 2011*] (Figure I.3) :

- Renforts plaquettaires ;
- Renforts fibrillaires ;
- Renforts particulaires.

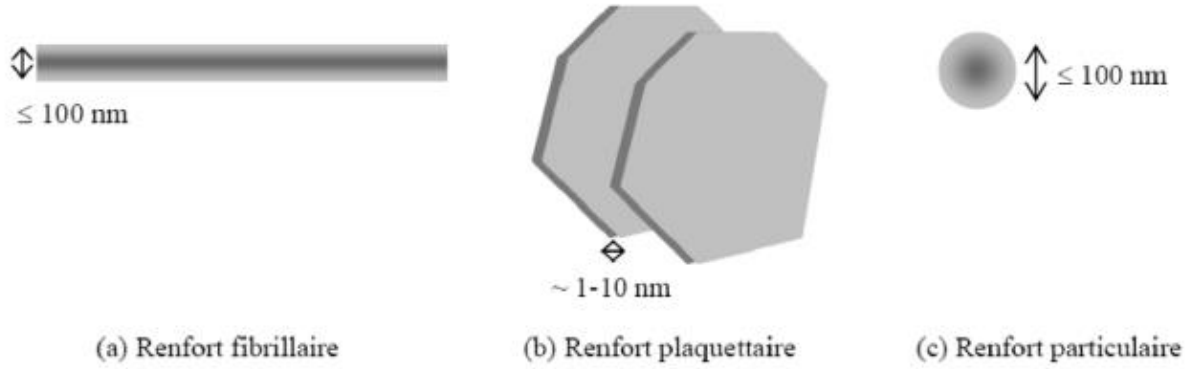


Figure I.3 : Différents morphologie du renfort [*Cauvin, 2009*].

I.4.1.1.1. Renforts de type 1D (plaques/lamelles/feuillets) (figure I.3b)

Ce sont des renforts dont une des dimensions est de l'ordre du nanomètre ; ces charges se présentent sous forme de plan d'épaisseur de l'ordre du nanomètre, de dimensions latérales allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de nanomètres et d'un facteur de forme (longueur/largeur) au moins égal à 25. Ces charges plaquettaires peuvent être aussi bien des argiles naturelles (montmorillonite) ou synthétiques (laponite) que des phosphates de métaux de transition (phosphate de zirconium) [*Dihaj, 2018*].

Les argiles sont généralement utilisées à des taux inférieurs à 10% en masse en raison de l'augmentation importante de la viscosité avec le taux de la charge élevé [*Lasmi, 2014*].
Les nano composites dans ce cas sont obtenus par intercalation du polymère dans les galeries situées entre les plans des feuillets [*Abdelli, 2008*].

I.4.1.1.2. Renforts de type 2D (nanotubes et nano fibres) (figure I.3a)

Ce sont des renforts dont deux dimensions sont de taille nanométrique et le troisième est très largement plus grand, formant une structure fibrillaire. Le renfort se présente donc sous forme de tube (nanotubes de carbone) [*Peeterbroeck, 2004*] ou sous forme de fibre (silicates aciculaires : la sépiolite) [*Baziz, 2010*]. Une attention particulière sera portée à ce type des renforts, les nano composites à nanotubes de carbone (CNT) étant les matériaux étudiés dans le cadre de cette thèse.

I.4.1.1.3. Renforts de type 3D (nanoparticules sphériques) (figure I.3c)

Dans ce cas, les trois dimensions sont de l'ordre du nanomètre. Il s'agit de nanoparticules iso dimensionnelles telles que la silice souvent utilisée dans les silicones, le noir de carbone utilisé comme renfort dans les pneus [*Fina, 2006*], [*Liu, 2009*], [*Chabert, 2002*].
Le tableau I.1 répertorie les caractéristiques géométriques des principaux nano renforts dont les rapports d'aspects sont très différents d'un type à l'autre.

Tableau I.1 : Dimensions caractéristiques des principaux nano renforts [*Gloaguen, 2007*].

Géométries	Renforts	Dimensions caractéristiques	Rapports d'aspect (épaisseur/diamètre)
Sphériques	Noir de carbone Particules de silice	250nm 30-150nm	1 1
Fibrillaires	Whiskers de cellulose	Φ=15nm (diamètre) L=1µm (longueur)	>250
	Nanotubes de carbone	Φ=30nm (diamètre) L=10-50µm (longueur)	>300
Plaquettaires	Silicates en Feuillets	Φ=50-500nm (diamètre) E=1nm (épaisseur)	1/50 -1/500

I.4.1.2. Classification selon leur nature

I.4.1.2.1. Noir de carbone

Actuellement, le noir de carbone est la particule conductrice la plus utilisée dans l'élaboration des composites et des polymères conducteurs, en raison de son prix de revient relativement faible, et de sa faible densité. Le noir de carbone se présente sous la forme d'une poudre constituée de particules. A l'échelle nanométrique, les particules de noir de carbone sont des masses sphéroïdales constituées par des atomes de carbone ayant une organisation plus ou moins graphitique (figure I.4).

Figure I.4 : Vue en coupe d'une particule de noir de carbone [*Hassar, 2013*].

Ces particules élémentaires ont des tailles de quelques dizaines de nanomètres. Elles sont liées entre elles par des liaisons covalentes et s'organisent en clusters pour former des entités tridimensionnelles complexes d'une centaine de nanomètres appelées agrégats. A leur tour, ces agrégats s'assemblent en amas par l'action des forces attractives du type Van der Waals pour former des agglomérats dont la taille peut atteindre plusieurs centaines de microns [*Hassar, 2013*].

Il existe de nombreuses qualités de noir de carbone, en fonction des matières premières utilisées ainsi que des conditions de combustion et de décomposition thermique [*Environnement Canada, 2011*]:

- **Le noir de fourneau**, obtenu par combustion incomplète de gaz naturel ou de résidus pétroliers lourds, est la forme la plus commercialisée (95 %) ;
- **Le noir d'acétylène**, obtenu par craquage de l'acétylène à des températures de plus de 2000 °C, est un des noirs de carbone les plus purs, il possède un caractère conducteur marqué, et il présente une très forte agrégation ;

- **Le noir de fumée**, obtenu par combustion incomplète d'hydrocarbures de goudron, possède des qualités exceptionnelles de renforcement des pneumatiques en caoutchouc ;
- **Le noir thermique**, obtenu par chauffage d'une chambre réfractaire suivi d'une injection de gaz naturel qui génère la formation de carbone et d'hydrogène. Il présente les particules les moins fines (de 150 à 500 nm) et la surface spécifique la plus faible (de 6 à 15 m2/g) ;
- **Le noir tunnel**, produit par combustion incomplète de gaz naturel vers la fin du 19ème siècle, n'est pratiquement plus fabriqué actuellement. C'était la forme la plus commercialisée au début du 20ème pour le caoutchouc et les pigments (sa production est actuellement interrompue sauf en Allemagne), Ses particularités : granulométrie très fine (inférieur à 30nm), faible degré d'agrégation, taux élevé de substances volatiles (environ 5 %).

I.4.1.2.2. Poudres métalliques

Les poudres métalliques (argent, nickel, cuivre, aluminium) ont une densité de 0,6 à 2,2.
Elles présentent un faible facteur de forme et donc nécessitent de grandes concentrations pour obtenir un réseau conducteur.
Les composites contenant des particules métalliques dans leur composition, sont élaborés dans l'objectif d'obtenir un niveau de conductivité maximal.
Les charges métalliques possèdent un coefficient de dilatation thermique élevé et s'oxydent facilement, du fait, de leur énergie de surface très élevée. Ces charges vieillissent donc très mal dans un environnement oxydant, elles présentent une densité très grande comparativement avec la poudre de noir de carbone et un coût économique très élevé, ce sont les raisons qui restreignent leurs utilisations [*Hassar, 2013*].

I.4.1.2.3. Feuillet Argile

L'argile la plus étudiée dans l'industrie de la recherche est la montmorillonite (MMT) [*Brigatti, 2006*]. De par sa structure et sa composition chimique, elle est celui ayant le plus de pouvoir renforçant [*Uddin, 2008*]. Cette argile a été impliquée dans la synthèse pré biotique de biomolécules et des différentes sources de la vie sur terre. Les argiles sont également devenues indispensables à la vie moderne [*Gul, 2016*]. Elles ont été connues et utilisées par les humains depuis l'antiquité. Elle est le matériau de base de nombreux types de céramiques, telles que la porcelaine, des briques, des tuiles et des appareils sanitaires, ainsi qu'ils sont un des constituants essentiels des matières plastiques, les peintures, le papier, le caoutchouc et les

produits cosmétiques. L'argile est non polluante et peut être aussi utilisée en tant qu'agent d'élimination de polluant [*Bergaya, 2006*].

Ainsi, le potentiel de certaines argiles à disperser sous forme de particules unitaires d'une taille nanométrique dans une phase de polymère, formant des matériaux nano-composites ayant des propriétés supérieures est d'une grande importance pour le futur proche [*Bergaya, 2013*], [*Brigatti, 2006*], [*Gul, 2016*]. La diversité des structures et propriétés des argiles et des minéraux argileux et de leurs larges applications rendent difficile la compilation d'un texte de référence complet sur la science de l'argile [*Bergaya, 2013*].

Les minéraux argileux sont classés en différentes catégories dans la littérature. Ces classifications sont basées sur leur origine et leur structure chimique [*Obaje, 2013*]. Cette classification est principalement due à la variation de leur structure en couches semblable à une feuille [*Boussaboun, 2016*].

I.4.1.2.4. Graphène

La nanotechnologie ouvre des nouvelles frontières en science des matériaux et de l'ingénierie pour répondre aux besoins de l'humanité en créant des nouveaux matériaux, en particulier des nanomatériaux de carbone. Des efforts considérables ont été faits pour exploiter ce matériau dans des diverses applications [*Liu, 2012*].

Le graphène est constitué d'une seule couche mince d'atomes de carbones. Les couches de graphène empilées les unes sur les autres forment du graphite (figure I.5), avec un espacement inter planaire de 0,335 nm [*Garaj, 2010*]. Dans ce sens, des développements nouveaux sont en cours de réalisation, ayant comme objectif d'atteindre une production économique et de haute qualité. [*Boussaboun, 2016*].

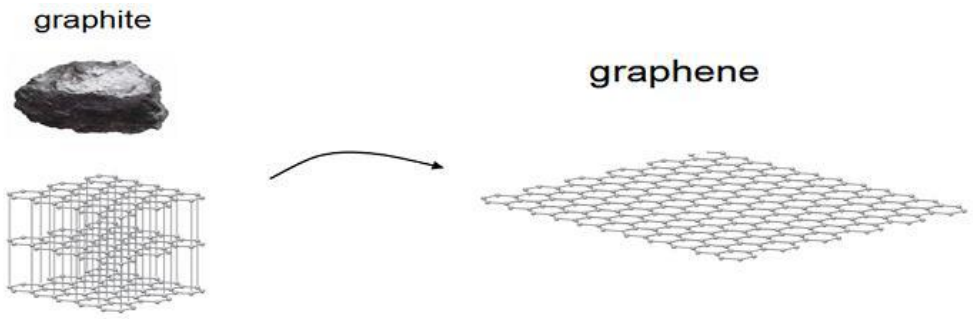


Figure I.5 : Graphène à partir du graphite [*Boussaboun, 2016*].

I.4.1.2.5. Nano-fibres de carbone (Nanotubes de carbone)

Six années après la découverte des fullerènes par Harold Kroto et al [*Kroto, 1985*], les nanotubes de carbone ont été révélés par Sumio Iijima en 1991 [*Iijima, 1991*] qui les a identifiés par microscopie électronique dans un sous produit de synthèse des fullerènes. Les nanotubes de carbone ressemblent à des feuillets de graphène enroulés sur eux-mêmes.

On trouvera plus de détailles sur les nano tubes de carbone dans le chapitre suivant.

I.4.1.2.6. Nano-fibrilles de cellulose

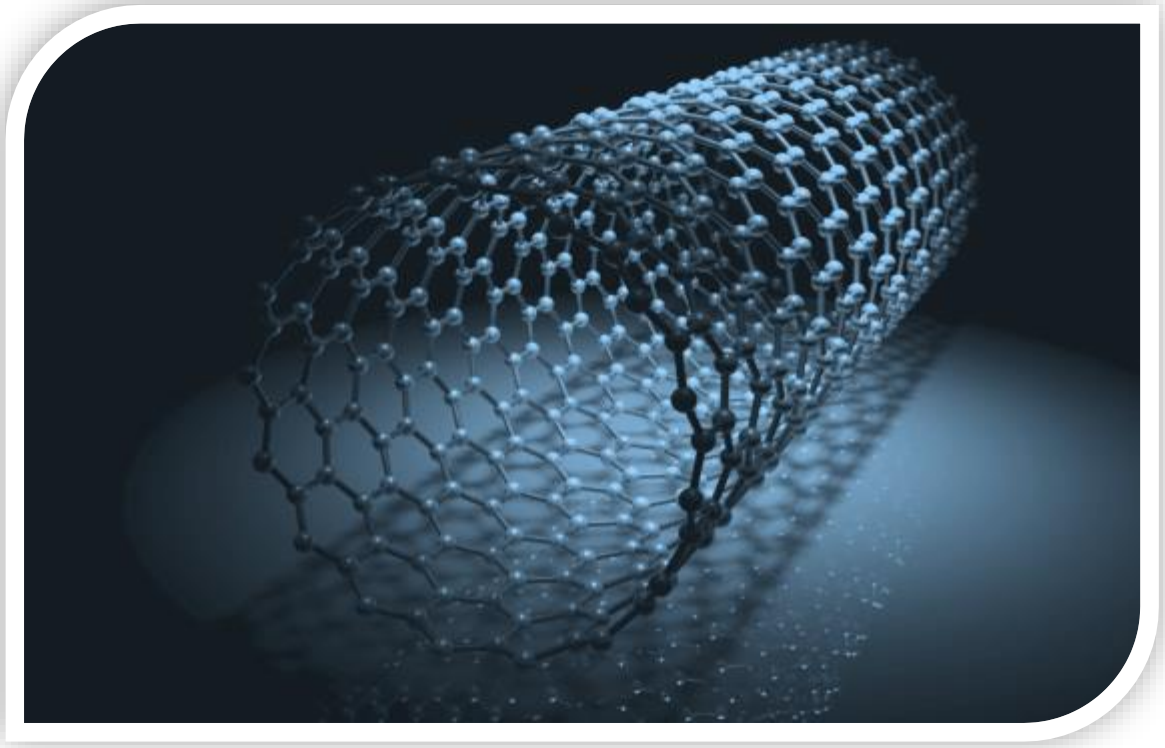
La cellulose est un biopolymère semi-cristallin très abondant sur terre qui forme le squelette rigide d'une grande variété d'espèces dont les végétaux, certaines algues, quelques champignons et les amibes. On la retrouve également dans le monde animal et plus particulièrement dans l'enveloppe externe d'animaux marins (les tuniciers).
La cellulose est identifiée en 1838, par le chimiste français Anselme Payen qui découvre après le traitement à l'acide ou à l'ammonium de différents végétaux qu'un composé fibreux peut en être extrait dans l'eau ou l'alcool. La cellulose est cependant déjà utilisée depuis des milliers d'années pour la fabrication de papier et de textile (coton) [*Privas, 2013*].
Alors, L'utilisation de ce type de nanofibres (NFC) comme additif pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques du papier a suscité récemment beaucoup d'intérêt, et un potentiel prometteur pour l'application dans le domaine de la technologie du papier et de l'emballage est prévu dans le futur ([*González, 2012*], [*Taipale, 2010*]).

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les nano-composites et les nano renforts puis leurs classifications selon plusieurs paramètres.
Les propriétés et les avantages des nano composites face aux composites classiques des, ont permis de créer des structures innovantes qui peuvent être exploitées dans de nombreux domaines d'application à savoir les structures spéciales et le génie civil.
On parlera dans le chapitre suivant sur les nano-composites utilisés des nanotubes de carbone (CNT) comme renforts dans une matrice polymère.

CHAPITRE II :

GÉNÉRALITÉS SUR LES NANO-COMPOSITES À BASE DE (POLYMÈRES/CNT)



II.Généralités sur les nano-composites à base de (polymères/CNT)

II.1. Introduction

L'utilisation des nanotubes de carbone dans les matériaux pour obtenir des nouveaux composites (nano composites) avec des propriétés spécifiques telles que les propriétés mécaniques, thermiques et électriques, présentent un grand intérêt dans différents domaines.

Pour les applications industrielles, la plupart des nano composites sont constitués d'une matrice généralement un polymère qui lie les points des renforts et participe au transfert des contraintes subit par le matériau final. Les renforts se présentent sous forme tubulaires nanométriques tels que les nanotubes de carbone qu'ont été synthétisés pour la première fois par Iijima [Iijima, 1991].

Dans le présent chapitre, nous discuterons brièvement les nanotubes de carbone, les polymères et leurs propriétés. Nous traiterons particulièrement la dispersion des renforts dans la matrice polymère et la production mondiale des nano-composites à base (polymère /CNT).

En second lieu, nous nous focalisons sur les procédés d'élaboration, en nous attachant à exposer les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux. Nous présenterons aussi les différentes propriétés mécaniques, thermiques, optiques et électroniques de ce type des nano composites. Enfin, nous s'intéressons à leurs applications.

II.2. Carbone

Elément chimique non métallique, le carbone est le quatrième élément le plus abondant dans le système solaire et le sixième plus abondant dans l'univers. C'est un atome capable de se lier d'une manière variée à un grand nombre d'atomes différents, ce qui lui permet d'offrir des possibilités de synthèse multiples. Cette versatilité est due à sa structure électronique particulière. Essentiel à la vie, on le retrouve à l'état naturel dans de nombreux composés chimiques (hydrocarbures, carbonates, molécules organiques …). Les formes traditionnelles du carbone sont le graphite, le diamant et les carbones mal organisés. De nouvelles formes du carbone ont été récemment découvertes, tels que les fullerènes et les nanotubes mono et multifeuillets ([*Buchoux, 2011*], [*Izard, 2004*]).

II.2.1. Les formes traditionnelles du carbone

Les formes traditionnelles de carbone les plus connues sont le graphite et le diamant. Ces derniers sont présents dans la nature sous forme de roches.

II.2.1.1. Le graphite

Le graphite c'est-à-dire le charbon, est un minéral noir fragile utilisé depuis des siècles pour l'écriture et est la forme la plus courante du carbone pur présentant dans les mines de nos crayons à papiers. Il a une couleur noire luisant se présentant une structure lamellaire constituée d'un empilement de feuillets. Chaque feuillet, ou plan de graphène, est constitué d'atomes de carbone. Le graphite en paillettes est opaque, flexible, gras et relativement tendre. La forme cristalline stable est constituée d'un empilement de plans de graphènes décalés d'une longueur de liaison par rapport au plan précédent selon la séquence (*ABAB*) comme représenté sur la figure II.1. La distance entre ces plans d'hexagones est plus élevée : (*0,34nm*). Cette structure particulière fait du graphite un matériau anisotrope [*Marcoux, 2002*]. Le graphite se révèle un excellent conducteur d'électricité et de chaleur, et il a un point de fusion élevé (3500 °C) [*Allaoui, 2005*].

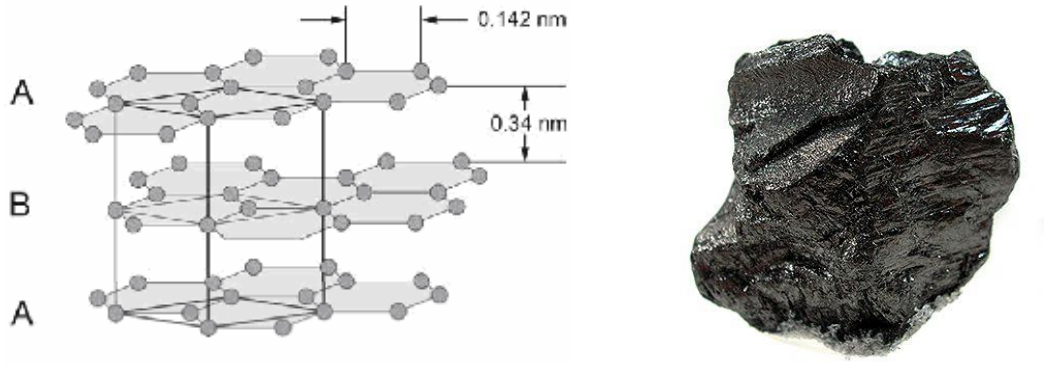


Figure II.1 : Représentation de la structure atomique du graphite [*Rizk, 2009*].

I.2.1.2. Le diamant

Le diamant est la forme la plus compacte du carbone qui possède une structure cubique à faces centrées avec la moitié des sites tétraédriques occupés (Figure II.2). C'est un minéral transparent qui ne se forme qu'à haute température (> 1000 °C) et haute pression. Il présente une plus forte densité que le graphite (3500 Kg/m3 contre 2200 Kg/m3 pour le graphite), une

grande cohésion et une énergie de liaison entre atomes de carbone très élevée et possède la plus haute conductivité thermique à température ambiante. C'est cette structure rigide qui fait du diamant le minéral naturel le plus dur qui soit [*Garrido, 2012*], [*Buchoux, 2011*], [*Lassagne, 2006*].

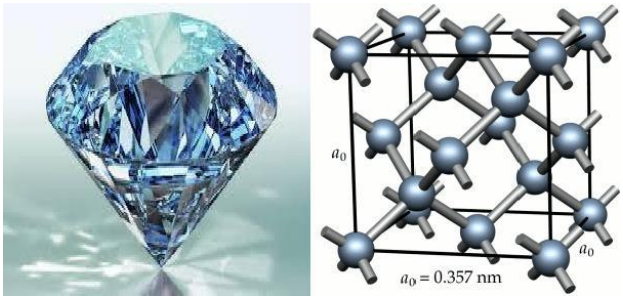


Figure II.2 : Structure de diamant [*Si Tayeb, 2021*].

II.2.1.3. Les carbones "mal organisés"

Le carbone ne présente pas toujours une organisation cristalline. Des formes de carbone mal organisées peuvent exister. Il s'agit d'un réseau désordonné d'atomes de carbone, présentant des états d'hybridation. C'est notamment le cas du carbone amorphe. A l'état naturel, le carbone amorphe est rare. Il est présent dans les particules des couches extérieures de l'atmosphère des étoiles froides, appelées poussières d'étoiles. Plus proche de nous, le carbone amorphe est synthétisé sous forme de couches minces, obtenues généralement par dépôt plasma. Il sert de revêtement apportant une tenue mécanique supplémentaire à des pièces industrielles. Dans ce cas, le carbone amorphe n'est jamais pur, mais légèrement hydrogéné. Notons qu'il est facile de synthétiser du carbone amorphe en laboratoire, en pyrolysant du sucre purifié à (*900 °C*), en l'absence d'air [*Marcoux, 2002*].

II.2.2. Les nouvelles formes du carbone

II.2.2.1. Fullerènes

L'élément principal du graphite, et également point de départ pour la construction de nouvelles nanostructures carbonées. Il peut prendre une forme sphérique, ellipsoïdale, d'un tube ou d'un anneau.

Le premier fullerène découvert par Kroto [*Kroto, 1985*], c'est le C60 ; le composé le plus abondant et le plus stable de la famille des fullerènes. La molécule C60, semblable à une cage

de carbone, forme une très petite nanostructure de 0,71 nm de diamètre de haute symétrie (structure icosaédrique), fournissant une cavité interne capable de contenir une grande variété d'atomes. Dans cette structure, un polygone avec 60 sommets et 32 faces, dont 12 pentagones et 20 hexagones, toutes les valences sont satisfaites par deux liaisons simples et une double liaison [*Enouz, 2003*].

Les fullerènes les plus connus sont les C60, C70 et C80 (figure II.3), mais il existe également les C76, C78, C82, C84 offrant ainsi de nouvelles bases pour développer de nouvelles branches de la chimie organique ou inorganique.

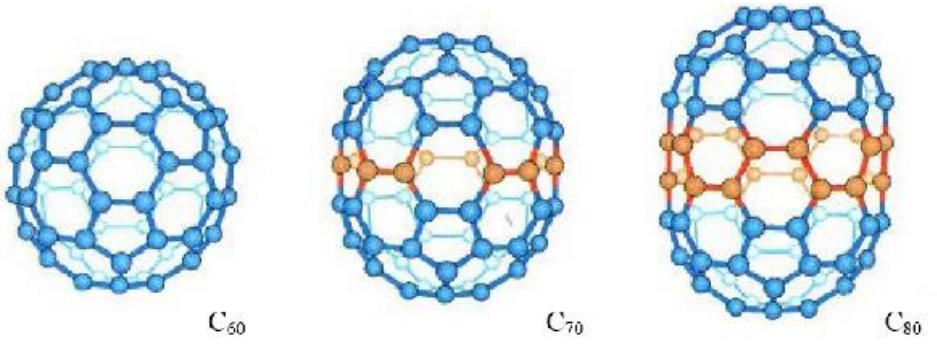


Figure II.3 : Représentation schématique des différentes formes des fullerènes les plus connus [*Bakhti, 2014*].

II.2.2.2. Nanotubes de carbones

Les nanotubes de carbone sont l'un des quatre états allotropies connus du carbone et les premiers produits industriels issus de la nanotechnologie. Ils sont souvent présentés comme le matériau miracle du XXI^{ème} siècle [*David R, 2009*].

Dans le paragraphe suivant, on va discuter en détails sur ce type de matériaux.

II.3. Généralités sur les nanotubes de carbone (CNT)

II.3.1. Définition

Ils sont composés d'un ou plusieurs feuillets d'atomes de carbone enroulés sur eux-mêmes suivant un rayon de courbure nanométrique, de manière à former une structure cylindrique creuse (un tube) d'une longueur mille fois plus que la largeur et d'un diamètre de l'ordre du nanomètre. L'angle d'enroulement du feuillet de graphène, appelé hélicité, donne la structure du nanotube. Cet angle varie de 0° à 30°compte tenu de la symétrie du réseau hexagonal et

permet de classer toutes les configurations possibles en trois catégories : chaise ou armchair, zigzag et chirale (voir le detail dans le paragraphe II.3.3). À chacune de ses deux extrémités se trouve une demi-molécule de fullerène. Cette molécule est constituée de 60 atomes de carbone, son diamètre est d'environ un nanomètre et elle est formée d'hexagones et de pentagones qui lui donnent une forme presque sphérique, semblable à un ballon de football (figure II.4).

Ces matériaux sont les premiers produits industriels issus de la nanotechnologie et ils sont souvent présentés comme le matériau miracle à cause de sa conductivité électrique, conductivité thermique et résistance mécanique des qui sont remarquablement élevées dans leur sens longitudinal. Ils occupent un rôle important dans la recherche sur les nanostructures et dans de nombreux domaines de la technologie, que ce soit en physique, en chimie, en ingénierie, en biologie et en médecine.

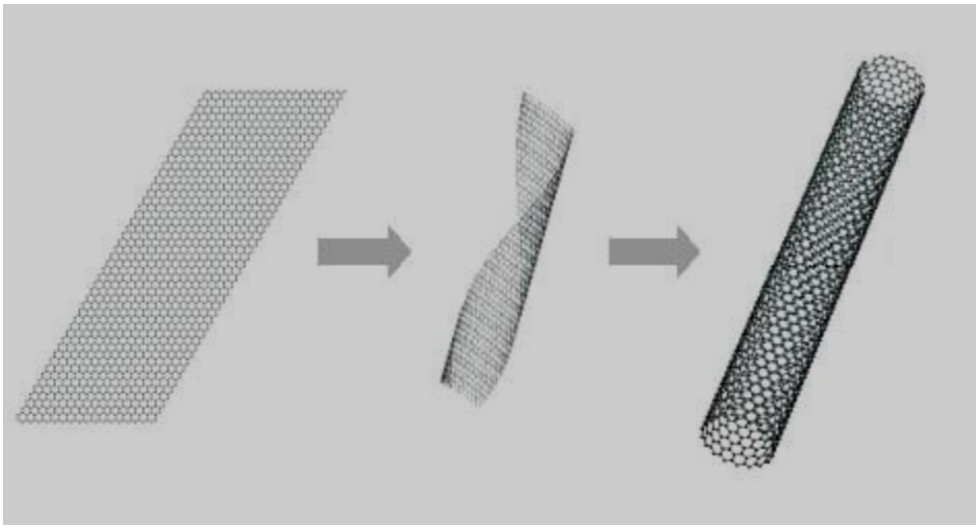


Figure II.4 : Du graphène nanotube de carbone. [*Marcoux, 2002*].

II.3.2. Découverte des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone étaient découverts en 1991 par un physicien japonais de NEC (Nippon Electric Company), Sumio Iijima, dans des suies issues d'une synthèse de fullerènes par la méthode de décharge par arc électrique [*Iijima, 1991*]. L'année suivante, Thomas Ebbesen [*Thomas, 1992*], un collègue d'Iijima chez NEC, mettait au point une méthode de synthèse des nanotubes multicouches (MWNT) en grandes quantités. Deux ans plus tard, les équipes d'Iijima [*Iijima, 1993*] et de Bethune [*Bethune, 1993*] publient successivement la découverte de l'existence des nanotubes de carbone mono couches (SWCNT).

Une plus grande attention a été accordée à ces matériaux lorsque le prix Nobel de chimie a été décerné en 1996 à Robert Curl, Harold Kroto et Richard Smalley [*Kroto, 1985*] pour la découverte des fullerènes dont le représentant le plus connu, C60, a été déclaré molécule de l'année 1991 par la revue Science.

De nombreux efforts ont été engagés afin de produire et suivre le développement des nanotubes de carbone, on cite par exemple : [*Rinzler, 1995*], [*Thess, 1996*], [*Tans, 1997*], [*Rinzler, 1998*], [*Ren, 1998*], [*Smith, 1998*], [*Liu, 1998*], [*Liu, 1999*], [*Berber, 2000*], [*Vigolo, 2000*], [*Collins, 2001*], [*Kociak, 2001*], [*Marcoux, 2002*], [*Rols, 2008*], [*Heireche, 2008*], [*Benzair, 2008*], [*Arani, 2011*], [*Maachou, 2011*], [*Zidour, 2011*], [*Naceri, 2011*] …

II.3.3. Structures des nanotubes de carbone

En fonction du nombre de feuilles de graphènes qui les constitue, les nanotubes de carbone peuvent être classés en deux grandes familles : les nanotubes de carbone mono feuillets (SWCNTs) et les nanotubes de carbone multi feuillets (MWCNTs).

II.3.3.1. Nanotubes de carbone mono feuillet, SWCNTs (single-walled carbon nanotubes)

Ces nanotubes sont composés d'une seule feuille de graphène enroulée sur elle-même et formée un cylindre. Le diamètre peut varier entre 1 et 2nm, la longueur est encore plus variable (100nm à quelques millimètres) [*Buchoux, 2011*], [*Bernard, 2007*]. La fermeture des tubes est permise par l'introduction de pentagones. En effet, ceux-ci ont pour effet de courber la surface du tube vers l'intérieur (courbure sphérique positive). Il faut six pentagones à chaque extrémité coniques, polygonales ou demi sphériques pour fermer complètement le nanotube.

La façon dont le feuillet de graphène est replié sur lui-même définit un paramètre, appelé chiralité, permet de caractériser les différents types de nanotubes existants : nanotubes de type « zig-zag » ; nanotubes de type « chaise ou armchair » et nanotubes de type « chiral » (voir figure II.5).

L'hélicité est définie par le vecteur chiral $\overrightarrow{C_h}$ et l'angle chiral θ qui sont déterminés par deux indices (n, m), dits indices de chiralité. La figure II.6 représente un feuillet de graphène défini par les vecteurs directeurs $\overrightarrow{a_1}$ et $\overrightarrow{a_2}$. Si on prend un point O quelconque sur la surface du nanotube et faisons le tour du tube dans un plan perpendiculaire à son axe de manière à revenir à notre point de départ (de O vers M), nous obtenons un vecteur $\overrightarrow{OM}$. Puis pour définir l'enroulement du feuillet, il suffit de décomposer le vecteur $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{C_h} = n\overrightarrow{a_1} + m\overrightarrow{a_2}$.

Si θ vaut zéro et m=0, le nanotube est appelé nanotube "zigzag» ; si θ vaut 30° et n=m, le nanotube prend le nom de "chaise". Les deux formes zigzag et chaise sont achirales c'est-à-dire qu'elles présentent une symétrie miroir plane normale à l'axe du tube. Par opposition, tous les nanotubes d'angle θ différent de 0° et de 30° sont chiraux.

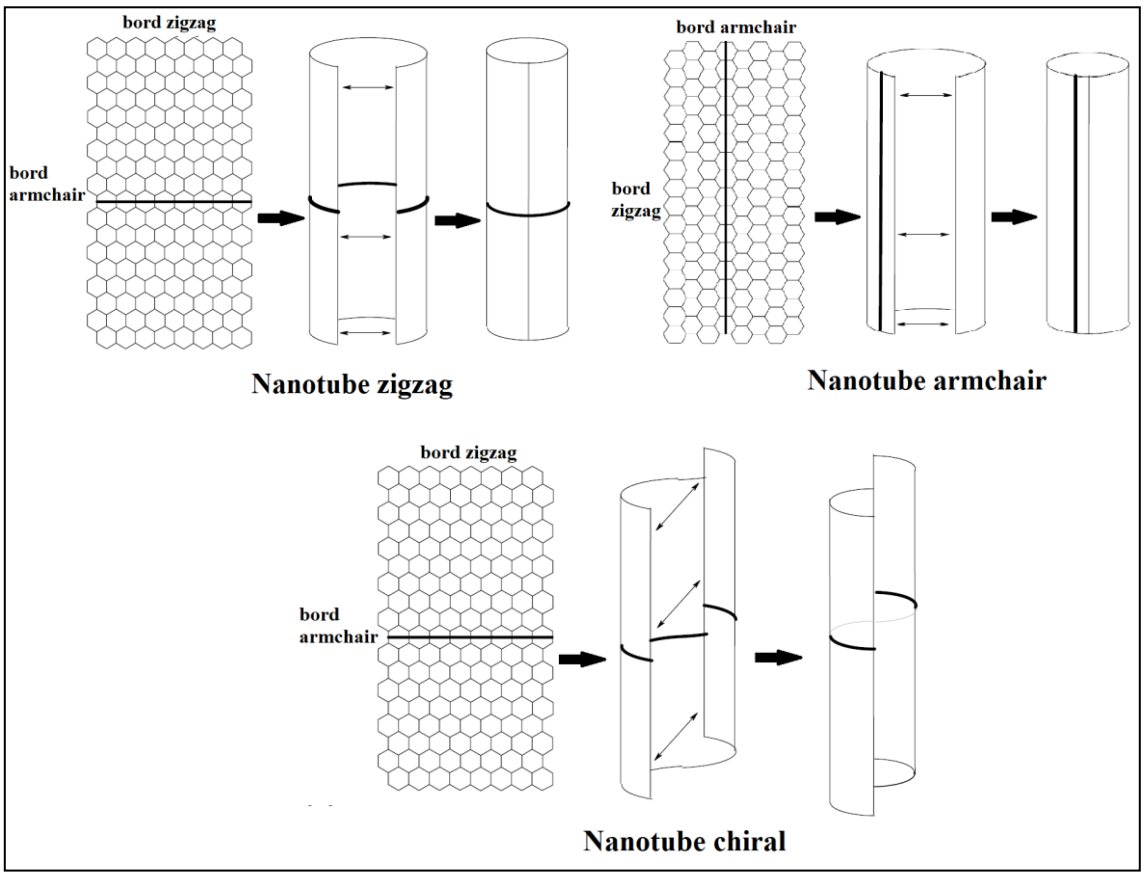


Figure II.5 : Différents types de nanotube de carbone SWNT.

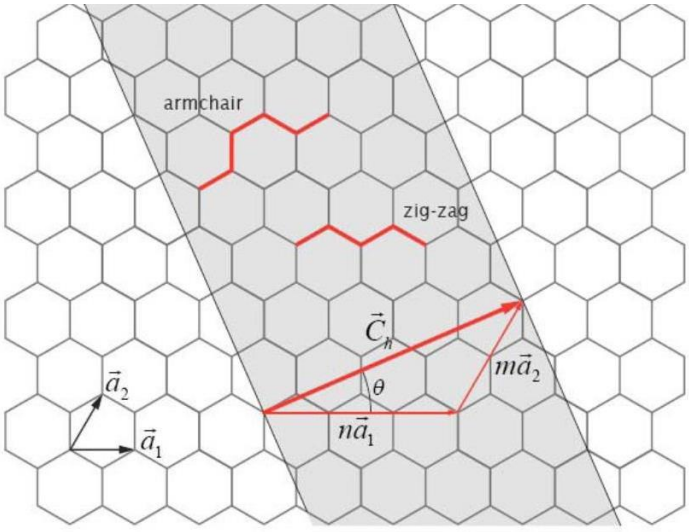


Figure II.6 : Enroulement d'un feuillet de graphène pour former un nanotube [*Thostenson, 2001*].

La chiralité a donc un impact sur le transport des électrons qui se fait d'une manière unidirectionnelle dans les tubes et donneras aux nanotubes de carbone des propriétés différentes notamment, en ce qui concerne les propriétés électriques (la conductivité).

II.3.3.2. Nanotubes de carbone multi feuillets, MWCNTs (multi-walled carbon nanotubes)

Ces nanotubes multi feuillets sont constitués d'un arrangement concentrique de feuilles de graphène, repliées sur elles-mêmes par une distance de 0.34 nm [*Iijima, 1991*] de manière à former des cylindres (figure II.7). Le diamètre interne d'un nanotube multi feuillet est de l'ordre de deux nanomètres, tandis que le diamètre externe est de l'ordre d'une vingtaine de nanomètres.

Il existe deux modèles pour décrire la structure des nanotubes multi feuillets basée sur un enroulement de feuillets de graphène, indiqués ci-après (figure II.8):

- le modèle poupée russe : l'enroulement de feuillets de graphène arrangés en cylindres concentriques;
- le modèle parchemin : l'enroulement d'un seul feuillet de graphène en spirale, comme une feuille de papier.

Les structures nanotubes multi feuillets (MWCNTs) ont plusieurs avantages et propriétés par rapport les structures nanotubes mono feuillet (SWCNTs). Par exemple, elles offrent une meilleure stabilité thermique et leur rigidité est accrue.

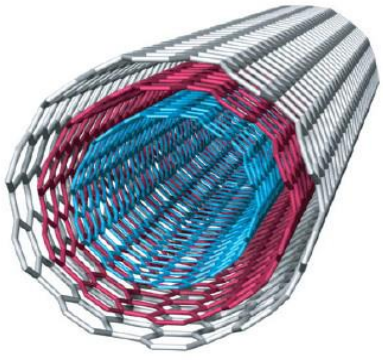


Figure II.7 : Structure schématique d'un nanotube de carbone MWCNT [*Bernard, 2007*].

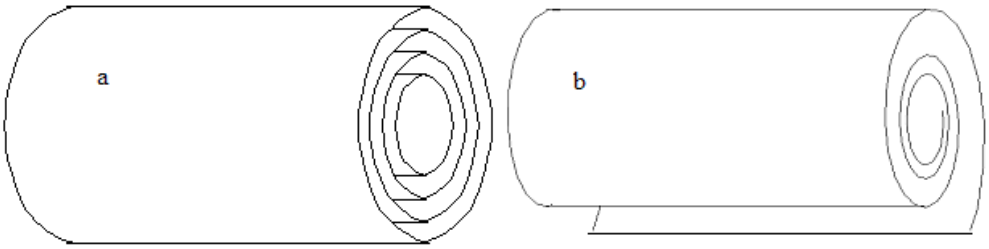


Figure II.8 : Modèles des nanotubes (MWCNTs). (a) Feuillets de graphène arrangés en cylindres concentriques ; (b) Feuillet de graphène unique enroulé en spirale. [*Bakhti, 2014*].

II.3.4. Synthèse des nanotubes

Il existe plusieurs procédés de synthèse des nanotubes ont été développés. Parmi celles-ci, il en existe : la synthèse par décharge d'un arc électrique entre deux électrodes de graphite, l'ablation laser, la décomposition catalytique de molécules contenant du carbone et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD : Chemical Vapor Deposition). Chacun de ces procédés possèdent leurs avantages et leurs inconvénients.

Actuellement le procédé de synthèse par CVD semble être celui le plus répandu pour la production industrielle des nanotubes de carbone commercialisés en grandes quantités.

II.3.4.1. Méthode de l'arc électrique

La première méthode qui a permis la synthèse des CNTs et est utilisée pour la première fois par [*Krätschmer, 1990*] sous des conditions de température et de pression élevées. Elle consiste à produire un arc électrique entre 2 électrodes de graphite, de *5 à 20 nm* de diamètre et *40 mm* de longueur, dans un gaz inerte (Ar, He, ...) à une tension allant de *20 à 40 V* entre les électrodes et un courant de l'ordre de *50 à 100 A* traversant les électrodes dont la température peut atteindre 6000°K (Figure II.9) [*Marcoux, 2002*].
Du gaz de carbone produit lors de cette vaporisation, se forment des nanotubes sur l'électrode plus froide (la cathode) ; ces nanotubes sont des MWCNTs et possèdent généralement 20 à 30 parois. Si on ajoute des catalyseurs métalliques à l'intérieur de l'anode (par exemple : Fe, Co, Ni, Y ou Mo), il est possible d'obtenir des nanotubes SWCNTs.
Ce procédé est peu coûteux et assez fiable. Cependant, le processus est tellement complexe qu'au final, on n'a que peu de contrôle sur le résultat. De plus, la haute température nécessaire au procédé ne permettait pas d'obtenir des quantités importantes de produit.

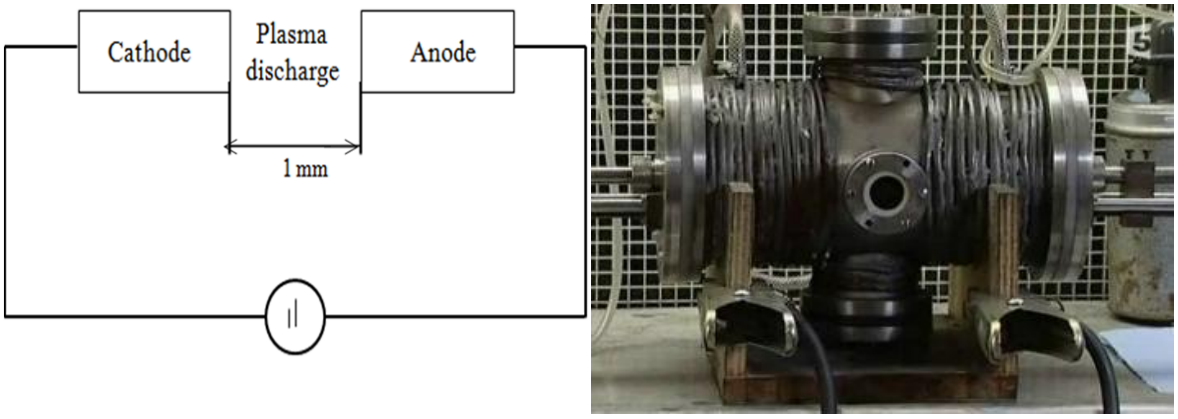


Figure II.9 : Production de CNT par la méthode de l'arc électrique [*Zidi, 2014*].

II.3.4.2. Méthode d'ablation laser

Cette méthode a été décrite pour la première fois en 1996. Cette technique repose sur l'évaporation des tiges de graphite avec des petites quantités des catalyseurs (Ni et Co) à température 1200 °C et atmosphère inerte, sous l'effet d'une forte irradiation laser [*Smalley, 1996*]. Les tiges (cibles) de graphite sont généralement placées au milieu d'un tube en quartz à une température de l'ordre de 1200°C. A l'extrémité du tube se trouve un collecteur en cuivre refroidi (figure II.10).

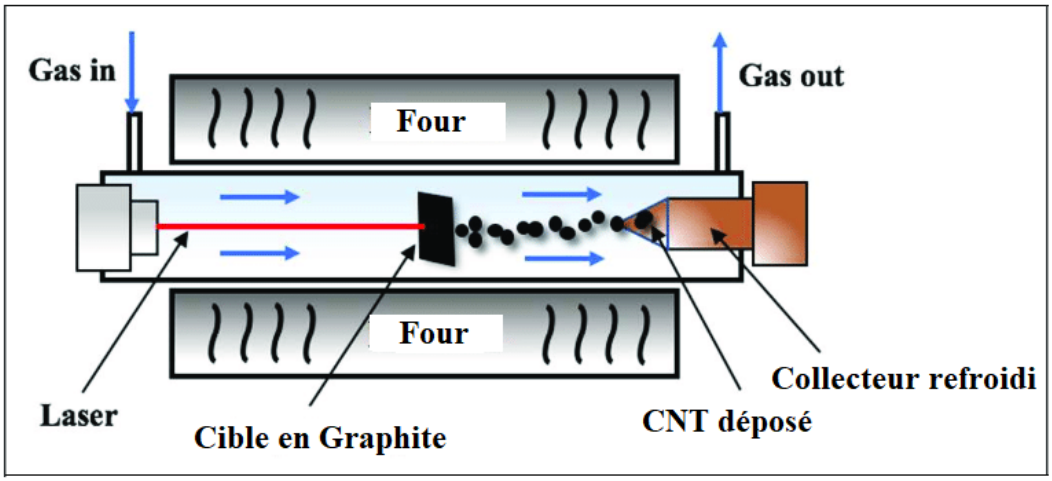


Figure II.10 : Schéma du dispositif de synthèse de CNTs par ablation laser [*Guo, 1995*].

Ce procédé certes plus couteux que le procédé par arc électrique mais il a d'autres avantages. Un des avantages de cette méthode est qu'elle permet de produire d'assez grandes quantités de nanotubes mono-paroi avec un rendement : 70% à 90% de la masse de graphite de départ est convertie en nanotubes [*Choudhary, 2013*]. Un autre avantage est qu'elle est plus facile de

contrôle. Plusieurs types de nanotubes peuvent être élaborés par ce procédé de synthèse comme le précédent : une cible de graphite pur produira des MWNT et une cible de graphite dopé d'un ou plusieurs métaux de transition (Ni, Co, ...) produira des SWNT [*Guerrero, 2008*].

II.3.4.3. Méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Cette synthèse a été effectuée pour la première fois en 1995 [*Endo, 1995*]. La *CVD* est une méthode catalytique qui nécessite la présence de métaux de transitions (*Ni, Fe, Co…*), dans un four porté à température plus de 700°C, pour la croissance de CNTs. Elle est effectuée en amenant une source de carbone en phase gazeuse à l'aide d'une source d'énergie (plasma ou chauffage résistif). Les gaz couramment utilisés sont le CH4, CO, C2H2, C2H4 et éthanol. Le catalyseur peut être supporté par un substrat où il peut se présenter soit sous forme de poudre dans un creuset (silicium en solution). Les nanotubes se forment alors sur les plots de catalyseurs (Figure II.11).

La plupart des procédés rencontrés sont souvent optimisés pour un type de gaz. Il est alors difficile de faire une étude comparative. Cependant quelques études montrent que le changement de type de gaz peut induire des variations sur les dimensions des tubes obtenus à savoir leur longueur et leur diamètre [*Lee, 2003*], et sur le type de structure (fibre, CNTs) [*Chen, 2000*].

Après réaction, les nanotubes contiennent encore des impuretés qu'il faut éliminer. Malgré la présence de ces impuretés dans le produit final, cette méthode est plus souvent utilisée par les industriels en raison de son coût de production plus faible et la possibilité de maîtriser plus facilement les paramètres d'élaboration et de fabriquer d'importantes quantités de nanotubes.

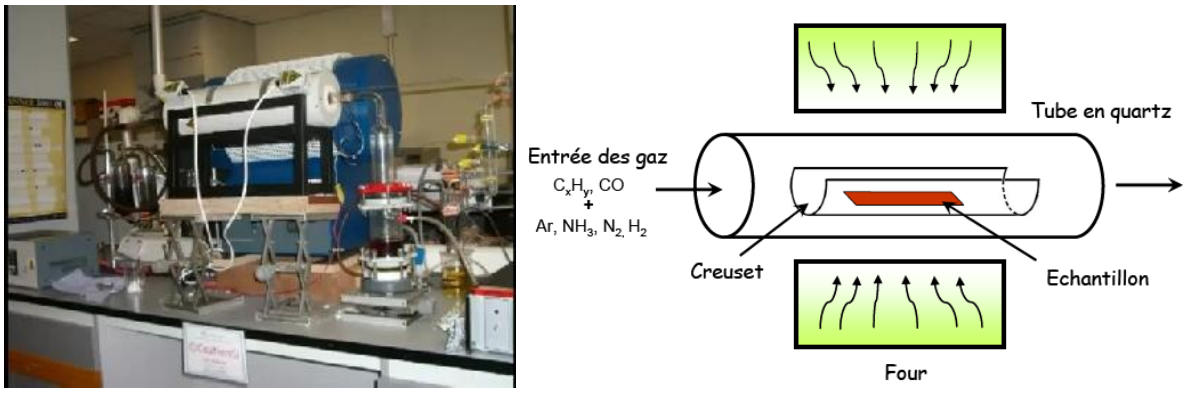


Figure II.11 : Schéma descriptif d'un réacteur CVD pour la croissance des CNTs [*Gohier, 2007*].

II.3.4.4. Décomposition catalytique (HiPCO)

Le procédé HiPCO (High Pressure dismutation of CO : décomposition sous haute pression de CO) a été développé par le groupe de R. Smalley [*Nikolaev, 1999*]. Cette méthode vise à décomposer un flux gazeux contenant un hydrocarbure (principalement CH4, C2H2, C2H4, C6H6, généralement en mélange avec H2) ou du monoxyde de carbone (CO) sur de petites particules d'un métal de transition, sous une pression de 10 atm dans une enceinte chauffée à 1200 ˚C (figure II.12).

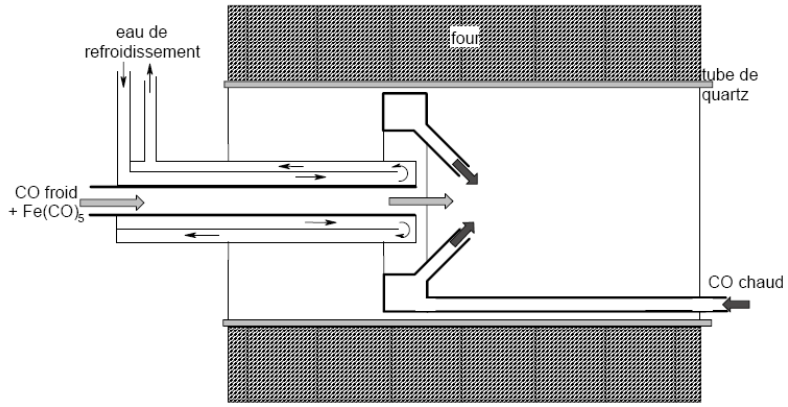


Figure II.12 : Schéma descriptif de la production de nanotubes par la méthode HiPCo [*Marcoux, 2002*].

L'avantage de cette méthode est de permettre la production d'échantillons de nanotubes sans carbone amorphe. Les seules impuretés dans le produit de synthèse sont les particules de catalyseurs métalliques. D'autre part, cette méthode permet de produire essentiellement des nanotubes à simple paroi distribués de façon aléatoire par des quantités comparables à celles obtenues par la méthode d'ablation laser.

Cette méthode est donc très utile pour la production de CNTs simple parois à l'échelle industrielle.

Le tableau II.1 ci-dessous résume les différentes synthèses citées précédemment :

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients des différentes synthèses de CNTs.

	Avantages	**Inconvénients**
Arc électrique	* Très simple, peu coûteux et assez fiable. * Elle peut produire différents types de nanotubes de carbone : des SWNTs ([*Bethune ,1993*], [*Iijima, 1993*], [*Saito, 1992*]) ou des MWNTs ([*Iijima, 1991*], [*Ebbesen, 1992*]).	* Le produit brut contient du carbone amorphe, des fullerènes (en faible quantité), et des restes de catalyseur. * Le processus est complexe et ne permet pas d'obtenir des quantités importantes de produit. * On ne peut pas contrôler bien les résultats. .
Ablation laser	* Plusieurs types de nanotubes peuvent être élaborés : une cible de graphite pur produira des MWNT et une cible de graphite dopé d'un ou plusieurs métaux de transition (Ni, Co, ...) produira des SWNT. Dans tous les cas des fullerènes et d'autres formes de carbone plus ou moins graphitisés sont observés [*Guerrero, 2008*]. * Elle permet de produire d'assez grandes quantités de nanotubes mono-paroi. Les rendements sont très élevés, (70% à 90%) de la masse de graphite de départ est convertie en nanotubes. * Elle permet aujourd'hui un contrôle de la distribution en diamètre avec une précision de l'ordre de (5%) [*Jost, 1999*].	* Cette technique est couteuse et complexe dans sa mise en œuvre, car elle repose sur l'utilisation de deux impulsions lasers successives de fréquences différentes. * Elle nécessite, pour l'instant, une purification du produit brut afin de disposer d'échantillons ne contenant que des nanotubes de carbone. * La suie issue de la synthèse ne contient pas seulement de nanotubes de carbone mono-paroi, mais aussi du carbone amorphe, des restes de catalyseurs et éventuellement des fullerènes.

Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	* Elle se forme de façon continue (contrairement à la méthode d'ablation laser par exemple). * La production de nanotubes de carbones multi-parois est relativement facile. * On peut faire croître les nanotubes à des endroits prédéterminés en utilisant des catalyseurs calibrés [*Dai, 1996*]. * Elle est plus utilisée par les industriels en raison de son coût de production plus faible et la possibilité de maîtriser plus facilement les paramètres d'élaboration.	* Elle ne permet pas, pour le moment, de fabriquer de grandes quantités de nanotubes mono-paroi. * La production de nanotubes de carbones mono-parois est relativement difficile.
Décomposition catalytique (HiPCO)	* Elle permet de produire des échantillons de nanotubes sans carbone amorphe. Les seules "impuretés" dans le produit de synthèse sont les particules de catalyseurs métalliques. * Elle permettra certainement de pouvoir produire des nanotubes par kilogramme [*Nikolaev, 1999*]. * Elle permet d'obtenir des nanotubes avec un diamètre moyen plus petit de l'ordre de (0,7 nm). * Les paramètres des CNTs peuvent être contrôlés en variant la pression de CO introduit dans le système.	* Elle contient malheureusement une quantitié importante de catalyseur résiduel. * Elle produit essentiellement des CNTs simple paroi distribués de façon aléatoire.

II.3.5. Propriétés des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone (CNTs) possèdent des propriétés mécaniques, thermiques, électriques, capillaires et optiques exceptionnelles dans les composites de matrice de polymère.

II.3.5.1. Propriétés mécaniques

Des calculs théoriques et des mesures expérimentales ont démontré que les nanotubes de carbone étaient des matériaux extrêmement rigides et résistants comparable à celles de l'acier,

touts en étant extrêmement légers. De nombreux travaux théoriques entrepris montrent un module d'Young des nanotubes de carbone très élevé grâce aux fortes liaisons chimiques entre les atomes C-C dans le graphite : des premières simulations sur des SWNT ont mis en évidence des modules de Young variant de 1 a 5,5 TPa [*Overney, 1993*], [*Yakobson, 1996*], [*Lu, 1997*], [*Jin, 2003*] et d'environ 1 TPa pour les MWNT. Concernant la contrainte à la rupture des CNT, elle est comprise entre 13 et 52 GPa pour des SWNT et entre 3 et 60 GPa pour des MWNT [*Yu, 2000*], [*Yamamoto, 2014*]. De plus, il faut observer que la résistance à la traction est de l'ordre de 150 GPa et que la résistance à la compression est comprise entre 30 et 120 GPa pour les deux types de nanotubes. Au vu de ces propriétés mécaniques, les CNT sont des candidats potentiels. Ils sont 100 fois plus résistants et 6 fois plus légers que d'autres matériaux classiques tels que les fibres de carbone, l'acier, le bois [*Komarov, 2004*].

II.3.5.2. Propriétés thermiques

Les mesures montrent que les nanotubes de carbone ont une conductivité thermique très élevée pouvant aller jusqu'à 6600 W/m.K dans le sens longitudinal et à température ambiante [*Berber, 2000*] en prenant en compte différents facteurs dans la détermination de cette valeur : le type de nanotube (SWNT ou MWNT), le nombre de parois et la méthode de mesure.

Des expérimentations sur des nanotubes ont permis d'obtenir des résultats très variables des conductivités, variant entre 2 400 et 3 500 W/m.K pour des SWNT ([*Li, 2009*], [*Pop, 2006*]) et entre 200 et 1 400 W/m.K pour les MWNT ([*Yang, 2004*], ([*Li, 2009*]). L'étude de Li, en 2009, montre que la conductivité thermique des SWNT est plus élevée que celle des MWNT. Pour comparaison, à température ambiante, le diamant a une conductivité thermique de 2 300 W/m.K et le graphite de 2 000 W/m.K dans le sens des feuillets.

II.3.5.3. Propriétés électriques

Les propriétés électriques uniques des nanotubes de carbone sont en grande partie dérivées de leur caractère unidimensionnel et de la structure électronique particulière du graphite [*Sander, 1998*] [*Saito, 1998*], [*Ducastelle, 2003*], [*Charlier, 2003*]. Elles dépendent directement de leur chiralité.

En ce qui concerne les nanotubes monocouches, les propriétés électroniques sont principalement liées aux deux nombres entiers n et m (les indices d'hélicité) du tube ainsi que son diamètre.

Les calculs théoriques sur des tubes infinis permettent de recenser les trois cas suivants [*Mintmire, 1993*] :

- ✓ Les nanotubes de configuration armchair (*n, n*) sont métalliques.
- ✓ Les tubes (*n, m*) avec (*n-m*) multiple de *3* non nul sont des semi-conducteurs de faible écart.
- ✓ Les autres nanotubes sont des semi-conducteurs à un écart large ou des isolants.

La figure II.13 résume ces résultats :

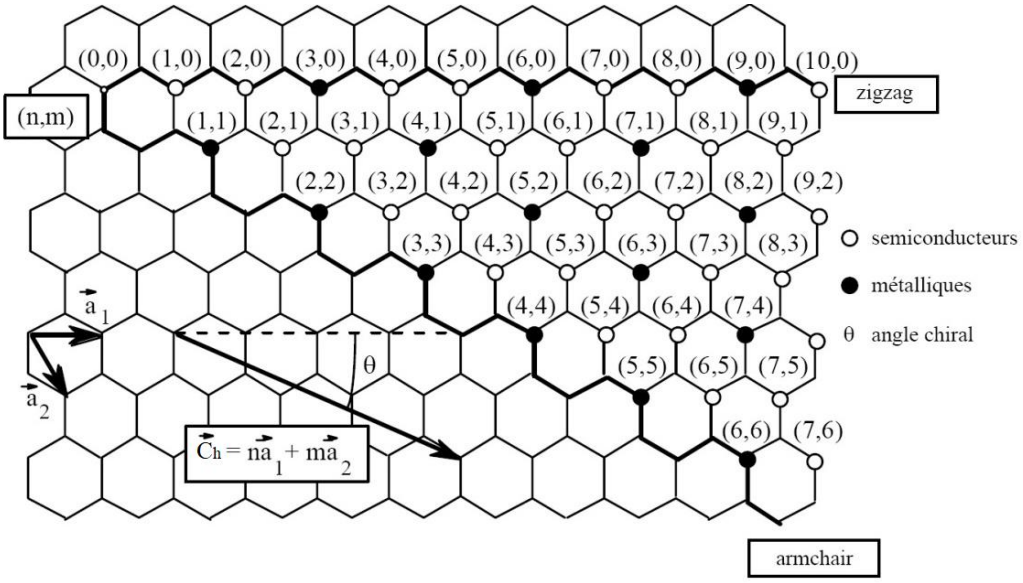


Figure II.13: Propriétés électroniques des nanotubes de carbone mono couches en fonction de leurs indices de chiralité (n, m).

En ce qui concerne les nanotubes multifeuillets, Charlier et Michenaud [*Charlier, 1993*] ont démontré qu'un nanotube, placé à l'intérieur d'un autre, effectue une rotation sur lui-même afin de trouver l'interaction inter-couche la plus énergétiquement favorable. Ils ont également prouvé que des tubes métalliques coaxiaux pouvaient devenir semi-conducteurs en raison des interactions inter couches. Démontrant ainsi que dans un nanotube (MWNT), les propriétés électroniques de chaque nanotube interne varient en fonction de leurs positions relatives [*Lambin, 1994*].

Les nanotubes de carbone peuvent supporter une forte densité de courant de (100 MA.cm-2) [*Wei, 2001*] et ont une résistivité de l'ordre de (10-4 Ω.cm) dans le cas des (MWNTs). Ainsi, une des applications les plus prometteuses pour les nanotubes de carbone est l'apport de la

conduction électrique dans les polymères en utilisant une très faible quantité de nanotubes tout en conservant les propriétés de la matrice polymère [*Saint-aubin, 2010*].

II.3.5.4. Propriétés de capillarité

Le nanotube peut être considéré comme un « nano fil » creux qu'il est possible de combler par capillarité. Alors, on peut l'encapsuler à l'intérieur par des éléments solides. Plusieurs des articles ont été publiés sur le thème du remplissage des nanotubes de carbone par des éléments solides pour constituer des nanofils encapsulés : éléments purs (Pb, Bi, Sn, Mn, Cr, Fe, Ni, Co, Pd, Cu, etc.), oxydes (MoO3, SnO, CoO, V2O5, GeO2, etc.), carbures (C2, SiC, TiC, etc.), sulfures (CrSx, NiSx, CrSx, etc.), chlorures, nitrures, alliages ([*Ajayan, 1993 (1)*], [*Grobert, 1999*], [*Suenaga1, 2000*], [*Suenaga1, 2001*], [*Gohier, 2007*])(voir la figure II.14).

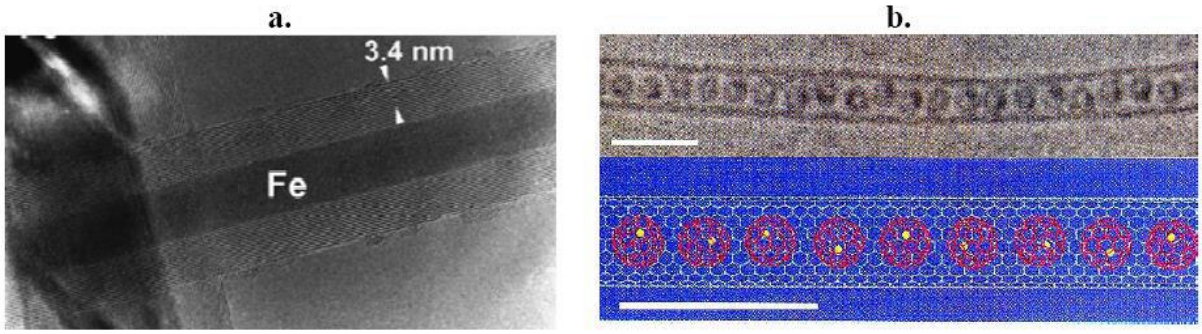


Figure II.14 : Nano fils encapsulés

a. Fe encapsulé dans un MWNT [*Grobert, 1999*], **b.** C82 encapsulé dans un (SWNT). [*Suenaga1, 2000*].

II.3.5.5. Propriétés optiques

Les nanotubes de carbone présentent des propriétés de limitation optique dans une très large gamme de longueurs d'onde depuis le visible jusqu'au proche infrarouge. De grandes densités optiques ont été obtenues lors de l'étude de dispersions aqueuses des nanotubes monocouches [*Vivien, 1999*]. Le matériau le plus noir jamais conçu par l'homme est un tapis de nanotubes disposés verticalement, réalisé par des chercheurs de l'université Rice. Il est trente fois plus sombre que le carbone, ce qui lui permet d'absorber 99,955 % de la lumière qu'il reçoit.

Les nanotubes présentent donc des propriétés d'absorption intéressantes dans l'infrarouge. [*Marcoux, 2002*], [*Xu, 2001*].

II.3.6. Purification des nanotubes

Les matériaux synthétisés de nanotubes de carbone contiennent des quantités significatives d'impuretés. Les techniques les plus performantes sont souvent très coûteuses et donnent de faibles rendements. Il existe plusieurs méthodes pour la purification des nanotubes de carbone (méthodes chimiques et méthodes physiques), mais aucune d'entre elles n'est parfaite. Des conditions très dures sont souvent nécessaires selon la méthode de synthèse utilisée. Les impuretés principales sont des feuilles de graphite, du carbone amorphe, des métaux (catalyseurs) et des fullerènes.

II.3.6.1. Méthodes chimiques

On peut distinguer deux méthodes pour purifier les échantillons de nanotubes de carbone :

- La méthode d'oxydation sélective [*Vaccarini, 1999*] qui permet d'´eliminer par oxydation les impuretés (catalyseur, carbone amorphe) sans affecter les tubes à une température inférieure à 400˚C. Il existe des améliorations permettant de pallier des imperfections des méthodes décrites, notamment l'intercalation de potassium permettant d'exfolier les couches de graphite autour des particules métalliques et ainsi réduire le nombre de traitements nécessaires pour les enlever.
- La fonctionnalisation et la solubilisation sélective des tubes par rapport aux impuretés [*Yudaska, 2000*], [*Rinzler, 1998*] permettent d'isoler par filtration ou décantation les nanotubes des impuretés non tubulaires. Les techniques utilisées pour la solubilisation et la fonctionnalisation des nanotubes de carbone, sont décrites dans la section suivante.

II.3.6.2. Méthodes physiques

Les méthodes physiques utilisées pour purifier les échantillons de nanotubes de carbone sont principalement la filtration **[***Duesberg, 1998***]**, **[***Duesberg, 1999***]** la centrifugation **[***Bonard, 1997***]** et la séparation par FFF (field-flow fractionation).

La séparation par filtration est basée sur la différence d'aspect de forme et de solubilité entre les CNT, les carbones amorphes, les fullerènes et les particules métalliques. Les particules de petites tailles ainsi que les particules solubles sont récupérées dans le filtrat tandis que les CNT (présentant un grand aspect de forme) demeurent dans le résidu.

La centrifugation s'appuie sur l'effet de la gravité sur les particules et leur stabilité en solution. Cette différence de stabilité est liée aux charges négatives présentes sur les CNT préalablement traités par un acide **[***Hu, 2005***]**.

La séparation par FFF permet le triage des particules en fonction de leurs dimensions. Cette technique permet ainsi de séparer les CNT suivant leur taille. Elle peut s'appliquer sur une large quantité de produit. Cette technique permet ainsi d'obtenir des CNT bien définis qui peuvent être utilisés dans des applications précises telles que la nanoélectronique **[***Chun, 2008***]**.

II.3.7. Défauts des nanotubes de carbone

Parmi les défauts présents dans les nanotubes pouvant avoir une influence notable sur les propriétés mécaniques, nous distinguons les dislocations, les agglomérats (fagots), et les défauts topologiques. Les atomes de carbone peuvent former par exemple des pentagones (introduisant des courbures positives) ou des heptagones (conduisant à des courbures négatives) plutôt que des hexagones (voir la figure II.15) [*Marcoux, 2002*].

Les dislocations entraînent une diminution de la résistance à la rupture, alors que les défauts topologiques, lorsqu'ils induisent une courbure locale de la couche de graphite, peuvent diminuer le module élastique effectif d'un nanotube.

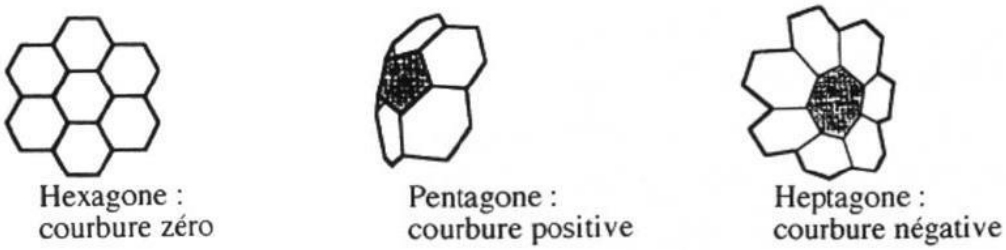


Figure II.15 : Défauts pentagonaux et heptagonaux de CNT. [*Marcoux, 2002*].

La combinaison de plusieurs de ces défauts sur un tube peut induire un grand nombre de géométries particulières. Ainsi, du fait de l'annulation de leurs courbures respectives à un niveau global mais non à un niveau local, une paire heptagone-pentagone (appelé défaut de Stone-Wales [*Stones, 1986*]) peut provoquer une variation de diamètre et de chiralité le long du tube (figure II.16) et possible d'imaginer une grande quantité de structures variées (jonctions en Y, en T, etc.) (figure II.17).

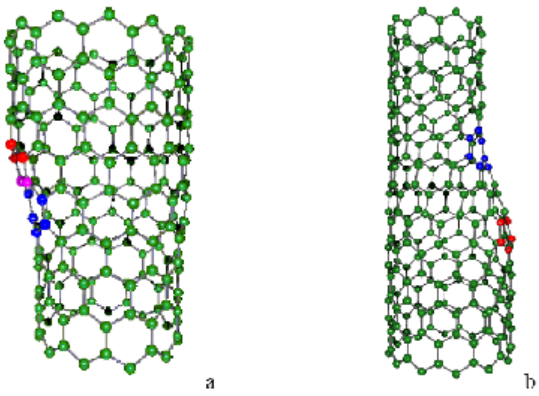


Figure II.16 : Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : (a) de (11,0) à (12,0) ; (b) de (9,0) à (12,0).

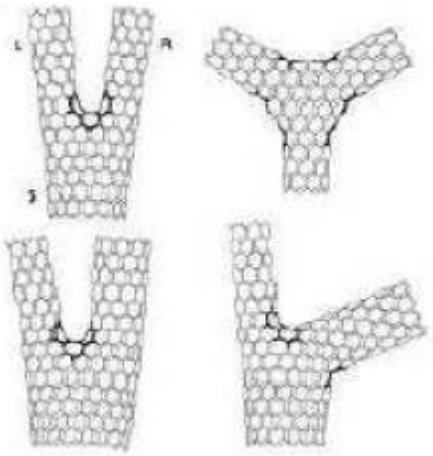


Figure II.17 : Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions.

II.3.8. Risques et préventions

Les risques de la fabrication et de l'utilisation des nanotubes à l'échelle industrielle sur l'environnement et la santé ont longtemps été ignorés. Cependant, l'Institut National de Recherche et de Sécurité(INRS) recommande de prendre toutes les précautions possibles lors de la manipulation des nanotubes de carbone et de nombreuses équipes de recherche étudient actuellement la toxicité potentielle de ces nanoparticules ([*Ricaud, 2008*], [*Wick, 2007*], [*Muller, 2005*]). Cette toxicité dépend de nombreux facteurs dans le cas d'une exposition non intentionnelle dont la voie d'exposition : orale, respiratoire ou encore cutanée.

Toutes les étapes de la production allant de la réception et de l'entreposage des matières premières jusqu'au conditionnement et à l'expédition des produits finis, en passant par le

transfert éventuel de produits intermédiaires peuvent risquer les salariés aux nanotubes de carbone. De même, leur utilisation et, plus précisément, leur manipulation, leur incorporation dans diverses matrices ainsi que l'usinage (découpe, polissage, nettoyage, perçage, etc.) de composites en contenant, constituent des sources d'exposition supplémentaire. Leur nature (poudre, suspension dans un liquide, intégration dans une matrice polymère, etc.), les méthodes de synthèse utilisées, le degré de confinement des différentes étapes, la quantité de produits manipulée, les moyens de protection mis en place et la capacité des produits à se retrouver dans l'air ou sur les surfaces de travail, constituent les principaux paramètres qui influent sur le degré de risque.

Les connaissances relatives aux dangers pour la santé humaine attachés à la fabrication et à l'utilisation des nanotubes de carbone sont encore très lacunaires. Des mesures de précaution doivent donc être définies et mises en place jusqu'à ce que l'importance des expositions professionnelles aux nanotubes de carbone et les risques sur la santé correspondants soient mieux connus et évalués.

Les principales voies de prévention sont :

- ✓ Optimiser le procédé de fabrication ou d'utilisation pour obtenir un niveau d'empoussièrement aussi faible que possible afin de limiter l'exposition (privilégier les systèmes clos et automatisés) ;
- ✓ Fabriquer et utiliser la substance sous une forme limitant sa dispersion : de préférence des nanotubes de carbone en suspension dans un milieu liquide plutôt qu'en poudre, intégrés dans une matrice minérale ou organique, etc. ;
- ✓ Capter les polluants à la source (ventilation locale) ;
- ✓ Filtrer l'air avant rejet à l'extérieur du local de travail ;
- ✓ Employer un équipement de protection individuelle ;
- ✓ Collecter et traiter les déchets ;
- ✓ Former et informer les salariés exposés ;
- ✓ Évaluer et suivre régulièrement l'exposition des salariés.

II.3.9. Producteurs sur le marché

Le marché mondial de nanotubes de carbone a subi une transformation commerciale rapide grâce à de bonnes relations avec la clientèle, à une croissance concurrentielle et à des avancées technologiques sur le marché mondial. Ce marché est évalué à 826,5 millions USD en 2021 et devrait atteindre 1 823,7 millions USD d'ici 2028 [*Web1, 2023*]. La demande de

véhicules légers à faible émission de carbone a fortement impacté le secteur des nanotubes de carbone. En conséquence, la montée rapide des industries d'utilisation finale telles que l'électricité, l'électronique et l'automobile, ainsi que la demande croissante de produits des industries d'application telles que le plastique, l'électronique et le stockage d'énergie, stimulent toutes l'expansion du marché au cours de la période de prévision. De plus, la gamme d'applications croissante des industries de l'automobile et de la construction et la fabrication croissante de polymères contribuent à l'expansion du marché des nanotubes de carbone.

Exemples de quelques producteurs des nanotubes de carbone **[*Web 2,2022*] :** Arkema (France), Arry International Group (China), Carbon Solutions (US), Cheap Tubes (US), CNano Technology (US), CNT Company (Korea), CNT Company (Korea), Hyperion Catalysis (US), Kumho Petrochemical (South Korea), Nano-C (US), Nanocyl (Belgium), NanoIn.

D'après les dernières recherches, la production mondiale de nanotubes de carbone atteint aujourd'hui plusieurs centaines de tonnes par an. Si l'on considère les capacités de production, le pôle Asie-Pacifique représente le premier pôle suivi par l'Amérique du nord et l'Union Européenne (figure II.18).

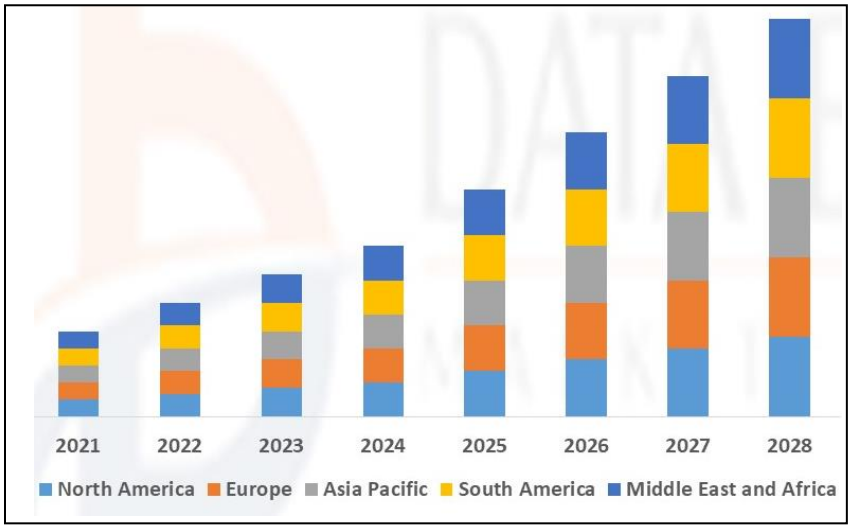


Figure II.18: Prévisions d'évolution du marché des nanotubes de carbone de 2021 à 2028 (Dernier rapport disponible sur **Data Bridge Market Research)** [*Web3, 2021*].

II.4. Généralités sur les polymères

II.4.1. Définition des polymères

Le terme polymère vient du grec « polus » qui signifie « nombreux, plusieurs » et « mêros » qui signifie « unité, partie ». Les polymères sont des matériaux constitués de longues chaînes macromoléculaires formées par la répétition d'un très grand nombre de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères qui liés entre eux par des liaisons primaires (liaisons covalentes). En général, les polymères sont formés à partir de 9 éléments chimiques : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le fluor, le silicium, le phosphore, le soufre et le chlore [*Kau, 2001*] [*Halary, 2006*].

L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation. Le nombre n ($n > 100$) de monomère est appelée « degré de polymérisation » ou « indice de polymérisation ».

Exemples de quelques polymères :

(PE) : Polyéthylène ; **(PP) :** Polypropylène ; **(PVC) :** Polychlorure de Vinyle ; **(PTFE) :** Polytétrafluoroéthylène ; **(PS) :** Polystyrène ; **(POE) :** PolyOxyde d'éthylène ; **(PMMA) :** Polyméthacrylate de méthyle ; **(PA) :** Polyamides.

II.4.2. Classification des polymères

Il existe plusieurs modes de classification des polymères qui peuvent être classés selon divers critères :

II.4.2.1. Suivant l'origine

Les polymères peuvent être d'origine naturelle, artificielle ou synthétique. [*Fontanille, 2010*]

II.4.2.1.1. Polymères naturels

Ce sont des composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose…

II.4.2.1.2. Polymères artificiels

Obtenus par modification chimique d'un polymère naturel, exemple : méthylcellulose.

II.4.2.1.3. Polymères synthétiques

Ils sont constitués de molécules monomères qui n'existent pas dans la nature. Cependant, les structures réalisées par synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels. **[***Tomalia, 2001*], [*Nicole, 2005*].

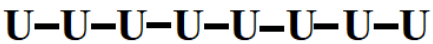
II.4.2.2. Suivant la structure chimique

Il existe deux types de polymères : Les homopolymères et Les copolymères [*Young, 2011*].

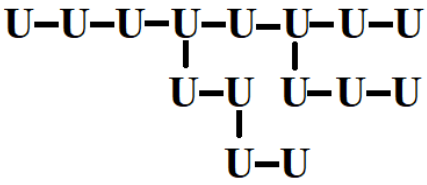
II.4.2.2.1. Homopolymères

Les polymères qui sont obtenus par la répétition d'une même unité constitutive sont appelés homopolymères. Il existe différents types d'homopolymères :

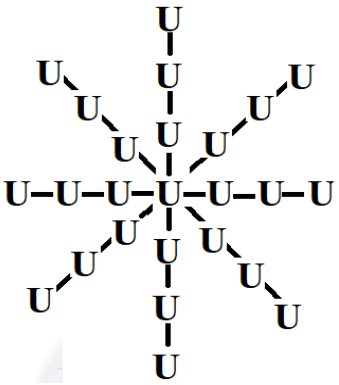
- les homopolymères linéaires :



- les homopolymères branchés :



- les homopolymères étoilés :



Ou (***U***) est l'unité de l'homopolymère.

II.4.2.2.2. Copolymères

Les copolymères sont des chaînes comportant plus d'un type d'unité de répétition. Ils peuvent être : aléatoires, périodiques, statistiques, à blocs ou à greffons.

II.4.2.3. Suivant le comportement thermique

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermiques en trois types [*Dupeux, 2004*] :

II.4.2.3.1. Thermoplastiques

Le terme thermoplastique traduit le fait que le type de polymère passe de l'état rigide à l'état malléable par une faible élévation de température. Ce type de polymère peut être ramolli par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique et répété un nombre infini de fois lors du moulage des pièces sans modification de la structure et sans altération des propriétés (polymère recyclable) [*Dupeux, 2004*]. Il se présente sous forme de

chaînes linéaires reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes (figure II.19).

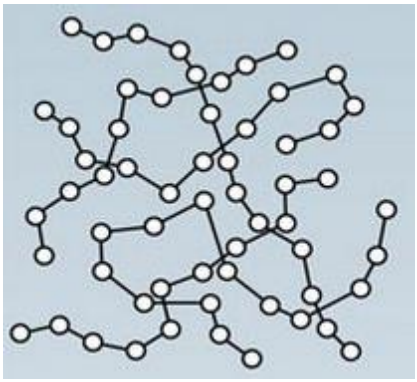


Figure II.19 : Représentation schématique d'un polymère thermoplastique. [*Recycled Plastics, 2014*].

II.4.2.3.2. Thermodurcissables

C'est polymères durcissent de façon irréversible sous l'action de la chaleur et/ou par ajout d'un réactif chimique. Dans ce cas les chaînes de départs sont beaucoup plus courtes et plus réactives (figure II.20). Ces polymères ne sont pas recyclables, et ce phénomène pose un problème, qui n'a pas encore de solution fiable. [*Paris.C, 2011*].

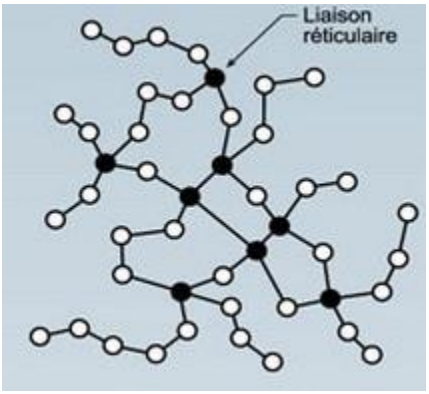


Figure II.20 : Représentation schématique d'un polymère thermodurcissable. [*Recycled Plastics, 2014*].

II.4.2.3.3. Elastomères

Les élastomères, sont fortement répandus dans le domaine de l'industrie. La multiplicité des utilisations des élastomères provient de caractéristiques mécaniques très intéressantes [*Arlie, 1980*] :

- Capacité à subir de grandes déformations sous faible compressibilité ;
- Capacité à dissiper de l'énergie, phénomène qui permet d'obtenir des propriétés d'isolation vibratoire et acoustique.

Ils présentent les mêmes propriétés élastiques que le caoutchouc. Au repos, leurs polymères de base sont constitués par de longues chaînes moléculaires repliées sur elles même (figure II.21). Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres. [*Davoudi, 2013*].

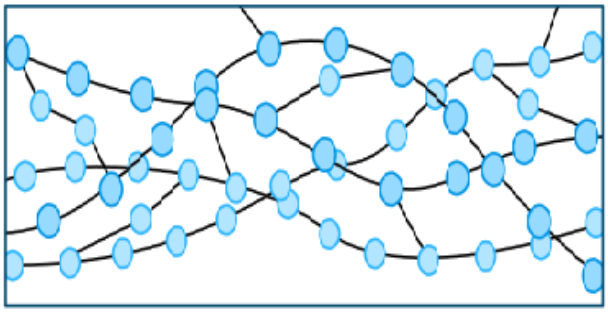


Figure II.21 : Représentation schématique d'un polymère élastomère. [*Web4, 2009*].

II.4.3. Structures moléculaires des polymères

En fonction de la structure moléculaire des polymères, on peut les classer en deux types :

II.4.3.1. Structures amorphes

Les polymères amorphes n'ont pas un ordre établi dans leur structure moléculaire qui les compose et peuvent être comparés à un bol de spaghettis cuits (figure II.22). Il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation de celles-ci dans des zones submicroniques. Ils peuvent être obtenu par un refroidissement très rapide du matériau à partir de l'état fondu (ou liquide), par la présence de ramifications, réticulations ou de groupements de grande taille au sein du monomère empêchant l'organisation périodique de la structure. Aux basses températures, les polymères sont durs et cassants. En revanche, aux hautes températures, ils sont mous et visqueux. [*Oudet, 1993*].

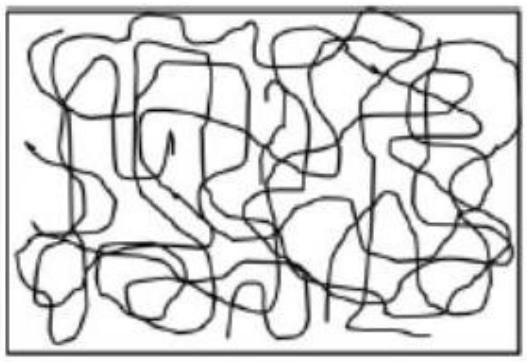


Figure II.22: Schéma d'une structure amorphe [*Oudet, 1993*].

II.4.3.2. Structures semi-cristallines

Les polymères ne sont jamais totalement cristallins et doivent en fait être considérés comme des mélanges de phases cristallines et de phase amorphe. Alors, la morphologie semi-cristalline se présente localement comme un ensemble de lamelles cristallines, séparées entre elles par une phase amorphe (figure II.23). Les deux phases sont liées entre elles par des segments de chaînes macromoléculaires appelés molécules de lien, car ces dernières peuvent participer à la formation de plusieurs lamelles cristallines en même temps. [*Haudin, 1995*], [*Nitta, 1999*].

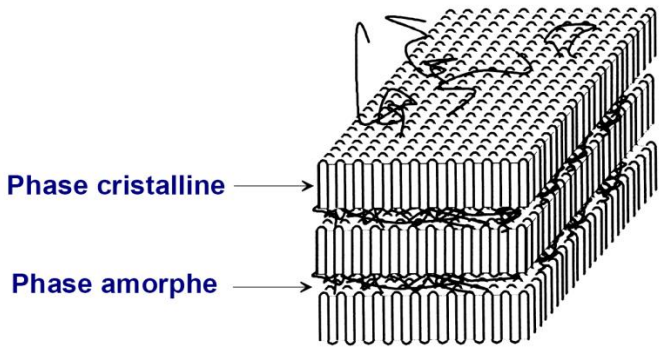


Figure II.23 : Structure d'un polymère semi-cristallin [*Addiego, 2006*].

II.5. Nano composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère)

Un nano composite de polymère est constitué par des nano charges dispersées dans la matrice polymère. Les nano charges telles les nanotubes de carbone jouent le rôle d'un renfort qui donnent de meilleures propriétés aux composites obtenus et sont de plus en plus utilisées ces

dernières années [*Xiao, 2007*]. Ajayan fut le pionnier de la fabrication de nano-composites à matrice polymère renforcée par des CNTS afin d'améliorer les propriétés, notamment mécaniques du nano-composite [*Ajayan, 1994*]. En effet, l'ajout de CNTs dans une matrice polymère lui confère en plus de la rigidité mécanique, des augmentations significatives de conductivités électrique et thermique [*Bozlar, 2009*].

II.5.1. Procédés d'élaboration des nano composites (CNT/polymère)

Selon l'état et le type de polymère, on rencontre dans la littérature généralement trois procédés de dispersion des nanotubes de carbone dans les matrices polymères : la polymérisation in-situ, le mélange en solution par voie solvant et le mélange par voie fondue.

II.5.1.1. Polymérisation in situ

Cette méthode consiste à disperser des nano charges dans des solutions adaptées de monomères puis à effectuer une polymérisation classique afin d'obtenir des nano composites [*Palkovits, 2005*]. Elle est divisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, les nano charges sont ajoutées au monomère liquide. Etant donné la faible viscosité de ce dernier, la dispersion des charges peut s'effectuer grâce à l'utilisation d'ultrasons ou encore via agitation mécanique en régimes turbulents. Une fois les charges bien dispersées dans la matrice, on débute la polymérisation (figure II.24.c).

Parmi les avantages de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas l'utilisation des solvants qui sont coûteux et difficiles à éliminer et qu'elle permet d'obtenir un bon état de dispersion notamment grâce au fait que les nano charges sont introduites dans le monomère fondu qui a une faible viscosité [*Penu, 2008*].

II.5.1. 2. Mélange en solution

Cette méthode est la plus courante pour préparer des composés de polymère/nanotubes. Elle consiste à disperser des nanoparticules dans une solution polymère à l'aide d'un solvant adéquat, puis à évaporer ce solvant pour former des films ou des feuilles nano composites (figure II.24.b). La dispersion des CNT dans la solution se fait généralement sous agitation par ultrasons [*Moniruzzaman, 2006*]. Cette agitation de la poudre de nanotubes dans un dissolvant facilite leur dispersion, peut également détruire les chaînes macromoléculaires [*Aubry, 2009*].

Un autre inconvénient provient de l'utilisation et l'élimination du solvant, sachant que ce solvant peut influencer sur les propriétés mécaniques du nano composite [*Chemi, 2018*].

II.5.1.3. Mélange à l'état fondu

C'est une des techniques classiques la plus simple pour préparer des composites polymères qui consiste à disperser des particules dans un polymère, à l'état fondu (figure II.24.a). Elle est particulièrement utile pour le traitement des polymères thermoplastiques.
L'avantage de cette technique est sa simplicité et sa compatibilité avec des techniques industrielles standard [*Breuer, 2004*]. Son inconvénient est que la viscosité augmente considérablement avec le taux de nano charges [*Lee, 2008*].

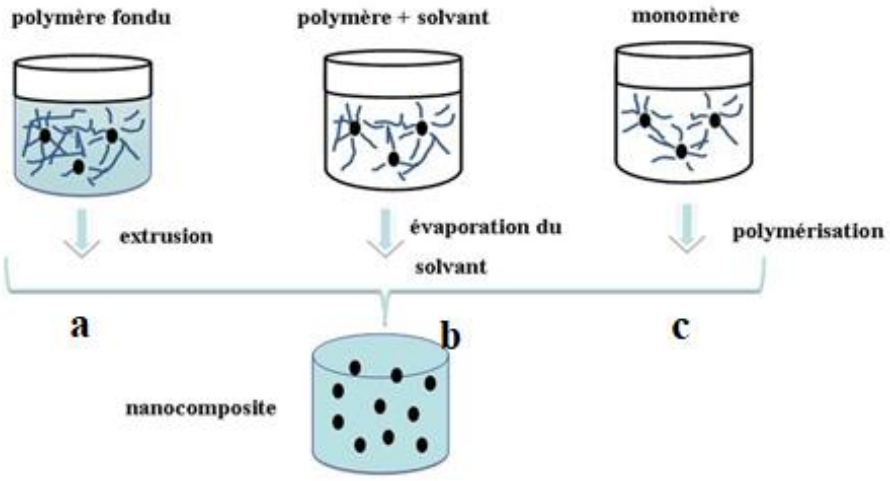


Figure II.24 : Procédés d'élaboration des nano composites [*Althues, 2007*].

II.5.2. Propriétés des nano composites (Polymère/CNT)

Le développement des nano composites à base des nano tubes de carbone et matrice polymère peut être considéré comme un avancement technologique significatif dans l'industrie au cours de ces dernières années, en raison de leurs propriétés mécaniques, thermiques et électriques.

II.5.2.1. Propriétés mécaniques des nano composites (Polymère/CNT)

Comme relaté ci-dessus, grâce à leurs propriétés mécaniques excellentes et leurs caractéristiques particulièrement exceptionnelles, les nanotubes de carbone suggèrent que l'incorporation d'une très petite quantité de ces nanorenforts dans une matrice polymère peut conduire à des matériaux de structure ayant un module et une résistance significativement

élevés. Des progrès importants ont été réalisés dans l'amélioration des propriétés mécaniques de la matrice polymère en mélangeant une petite fraction de CNT :

- Qian et al. [*Qian, 2000*] ont rapporté que l'ajout de 1% en poids de nanotubes MWCNT dans le polymère par la méthode d'évaporation en solution entraîne des améliorations respectives de 36 à 42 % et de 25% du module de traction et de la résistance à la traction.
- Biercuk et al. [*Biercuk, 2002*] ont également signalé une augmentation de 3,5 fois la résistance à la pénétration (dureté de Vickers) lors de l'ajout de 2% en poids de SWCNT en résine époxy.
- Cadek et al. [*Cadek, 2002*] ont également constaté, lors de l'ajout de 1% en poids de MWCNT dans la matrice polymère, une amélioration significative du module et de la dureté (1,8 fois et 1,6 fois respectivement). La dispersion et l'alignement homogènes des CNT dans la matrice polymère ont eu un effet manifeste sur les propriétés des composites résultants.
- Velasco-Santos et al. [*Velasco-Santos, 2003*] ont rapporté qu'en augmentant la dispersion de CNT lors de l'utilisation de polymérisation in situ, le module de stockage des nano-composites PMMA /MWCNT à 1% en poids de MWCNT à 90 ° C, s'accroit de 35%.
- D'après Kim [*Kim, 2007*], la dispersion des nanotubes dans une matrice polyéthylène téréphtalate permet d'augmenter le module d'Young du polymère de 1,5 GPa à 1,9 GPa ainsi que la contrainte à la rupture de 60 MPa à 68 MPa avec 2% en poids de CNT.

Bien que l'addition de CNT induise à une amélioration des propriétés mécaniques de la matrice polymère, l'amélioration qui en résulte, reste bien en dessous de la valeur attendue.

Au stade actuel, les propriétés extra ordinaires des CNT ne sont pas encore pleinement utilisées dans les composites polymères. De nombreux travaux de recherche ont révélé qu'une faible adhérence entre la matrice et le nanotube est le facteur limitant pour conférer les excellentes propriétés mécaniques des nanotubes dans les composites. Le transfert de charge de la matrice aux CNT jouant un rôle clé dans les propriétés mécaniques du nano-composite, une bonne liaison interfaciale est très importante car elle exerce une grande influence [*Schadler, 1998*].

II.5.2.2. Propriétés thermiques des nano composites (Polymère/CNT)

En raison de l'excellente et la mauvaise conductivité thermique des CNT et des polymères respectivement, l'incorporation des CNT améliore considérablement les propriétés de transport thermique des nano-composites à base des polymères [*Choi, 2003*], [*Hong, 2008*],

[*Wong, 2001*]. La plupart des polymères présentent une conductivité thermique très faible (entre 0,1 et 0,4 W/K.m) [*Han, 2011*]. Les conductions thermiques aux interfaces CNT/polymère et CNT/CNT ont été évaluées. S'il apparaît que l'interface entre eux n'est pas bonne, la conduction entre deux nanotubes en contact n'est également pas parfaite [*Huxtable, 2003*].

L'amélioration de la conductivité thermique des nano composite sa suscité de nombreuses recherches et représente un enjeu majeur pour les chercheurs. L'élaboration d'un matériau nano composite avec un niveau de conductivité thermique élevé, demeure donc, un défi important à relever du fait des applications prometteuses.

Diverses études ont récemment montré une augmentation de 40 % de la conductivité thermique d'une résine époxy ou du polyuréthane chargée à 0,5 % en masse des nanotubes de carbone [*Cai, 2008*], [*Wang, 2009*].

Biercuk a été montré que l'ajout de 1% en masse de nanotubes de carbone dans une matrice polyépoxyde, conduit à une augmentation de 125 % de la conductivité thermique à température ambiante [*Biercuk, 2002*].

En 2003, Choi a rapporté une augmentation de 300% de la conductivité thermique de la matrice époxy à la température ambiante sous une charge de 3% en poids de SWCNT.

D'autres études ont confirmé expérimentalement que l'alignement des nanotubes est bénéfique au transfert de chaleur dans le nano composite [*Gonnet, 2006*].

Par conséquent, il est important que les nanotubes soient suffisamment désagglomérés pour pouvoir former un réseau dans la matrice et conduire la chaleur.

II.5.2.3. Propriétés électriques des nano composites (Polymère/CNT)

Les CNT possèdent également une conductivité électrique intrinsèque très élevée. La conductivité électrique des différents nanotubes de carbone variait de 10^7 à 10^8 S/m [*Ebbesen, 1996*]. Elle a contribué à conférer une conductivité à un matériau hautement isolant tel qu'un polymère (leur conductivité moyenne est proche de 10^{-7} S/m). Les recherches montrent que l'ajout d'une faible quantité de CNT dans les matrices de polymère donne la possibilité d'obtenir un matériau alliant des propriétés électriques significativement améliorées. Zhang et al [Zhang, *2006*] ont, de cette manière, amélioré la conductivité électrique de films de polyéthylène en incorporant (5%) en masse de nanotubes de carbone. La conductivité électrique passe alors de (10^{-14} S/cm) pour le polymère vierge à (10^{-3} S/cm) pour le polymère

chargé. Pötschke et al [*Pötschke, 2002*] ont Observé également une conductivité électrique de (10^{-3} S/cm) pour le polycarbonate chargé à seulement (2%) en masse de CNT.
Les études montrent que la conductivité électrique des nano composites polymères renforcés aux CNT dépend de nombreux facteurs, notamment le type de CNT (SWCNT ou MWCNT), le rapport de longueur de CNT, la fonctionnalisation de surface et la teneur en CNT [*Li, 2007*], [*Lu, 2010*]. Cette conductivité dépend également du type de polymère, de la méthode de synthèse, du démêlage des agglomérats de CNT, de la distribution spatiale uniforme des différents CNT et du degré d'alignement [*Brying, 2005*].

II.6. Application des nano composites dans le domaine de Génie civil

Les nanotubes de carbone (CNT) font l'objet d'un des axes de recherche les plus importants en nanotechnologie. Leurs propriétés électriques, mécaniques et thermiques uniques et leur potentiel (ils sont potentiellement cent fois plus résistants et six fois plus légers que l'acier) pour des applications commerciales précieuses ont signifié qu'un énorme effort a été entrepris sur l'étude des nanotubes.

Au cours des deux dernières décennies, l'application de nouvelles générations de béton (béton intelligent) avec des propriétés physiques, structurales et techniques améliorées a été largement développée dans le domaine de génie civil en fournissant une structure moins défectueuse de la matrice de ciment ([*Xing, 2016*], [*Al-Dahawi, 2016*], [*Al-Dahawi, 2017*], [*Gupta, 2017*], [*Yoo, 2017*], [*Yildirim, 2018*], [*Yildirim, 2020*], [*Lee, 2020*]).
À l'avenir, de telles structures pourront être construites sans acier d'armature, grâce à la technologie des nanotubes de carbone.

Imaginez un immeuble moderne de grande hauteur sans acier. Plus maintenant, grâce à la technologie des nanotubes de carbone (CNT), même si le coût reste un facteur majeur, il existe désormais une technologie permettant de développer un béton à très haute résistance et à très faible perméabilité qui nécessite peu ou peut-être pas d'armature en acier.

Certains avantages attendus du béton enrichi en CNT incluent :

- un béton plus dur et plus résistant à l'abrasion pour les routes, les ponts, les pistes d'aéroport, les sols d'entrepôts, les parkings et autres zones à usage intensif.
- Un béton plus résistant, adapté aux immeubles de grande hauteur et nécessitant moins de renforcement en béton et en acier (voire même aucun), pourrait produire des structures

plus légères et plus solides avec des semelles plus petites, des dalles plus minces et des colonnes plus étroites.

- Un béton beaucoup plus dense et beaucoup moins perméable, en raison de la densité accrue du gel de ciment, réduirait considérablement l'absorption progressive de l'eau salée, le rendant parfaitement adapté à une large gamme d'applications marines et côtières difficiles, en particulier si une armature en acier n'est pas nécessaire. Le béton plus résistant, plus léger et moins perméable serait également bien adapté à une utilisation dans les murs de barrages et les déversoirs, ainsi que dans les conduites d'eau et d'égouts pour les projets d'infrastructure à grande échelle.
- Un temps de construction globalement plus court et des coûts inférieurs grâce à la réduction de la quantité de ciment, de béton et éventuellement d'acier constituent d'autres avantages.
- En raison des dalles et des colonnes plus fines et plus légères requises, le béton enrichi en CNT offre une flexibilité de conception considérable. Cet avantage deviendra particulièrement important si le besoin en acier peut être entièrement éliminé. Cela ouvrirait la voie à une plus grande flexibilité de conception et à de nouvelles techniques de construction.
- Le béton est le produit artificiel le plus utilisé au monde. Environ de 16 milliards de tonnes de béton est produite chaque année. Le ciment, composant essentiel du béton, représente à lui seul 4,1 milliards de tonnes par an. Cependant, La fabrication d'une tonne de ciment dégage environ une tonne de CO2. En réduisant la quantité de ciment et de béton requise pour une structure donnée, cela pourrait réduire considérablement l'empreinte globale des gaz carboniques de l'industrie du ciment.

Eden Energy, une société cotée australienne, a travaillé avec l'université Monash pour développer un mélange liquide enrichi en CNT qu'Eden fabriquera, qui pourra être ajouté au béton pour le rendre plus résistant. Eden débutera son premier essai commercial aux États-Unis avec du béton enrichi en CNT fin 2014, et débutera des essais en Australie en 2015 avec une grande entreprise mondiale de béton pour tester une gamme d'applications.

L'université Monash a réussi à augmenter la résistance à la compression de la pâte de ciment jusqu'à 30 % en ajoutant seulement un demi pour cent de CNT au ciment. Eden, lors d'essais aux États-Unis, a obtenu une augmentation similaire, ainsi qu'une augmentation de la résistance à la flexion de près de 14 %.

L'usage de renforts composites en fibre de carbone sur des structures en béton est aussi une technique de renforcement reconnue, efficace et bien plus performante que l'utilisation de plaques en acier. Cette technique de renforcement des structures consiste en la pose par collage de fibre de carbone, associé à des matrices polymères thermodurcissables (résines époxydes, polyester…), directement sur un support en béton sain et préparé.

L'utilisation des fibres de carbone permet de traiter de nombreuses problématiques liées à la construction neuve et réhabilitation. La fibre de carbone ne s'oxyde pas, ne provoquera pas de rouille, de coloration ou d'écaillage comme cela peut se produire avec l'armature en acier. Par conséquent, la possibilité de réduire la quantité d'enrobage de béton qui peut entraîner des réductions de poids significatives. Elle permet aussi d'améliorer considérablement les performances thermiques puis qu'elle ayant une faible conductivité thermique.

Ce type de renfort s'applique comme (voir figure II.25):

• Renfort de dalle, de poutre et de balcon à la flexion et l'effort tranchant,

• Renfort d'ouverture de trémie ou de porte,

• Confinement des poteaux,

• Renforcement au poinçonnement…

Il s'applique aussi sur : la maçonnerie, le bois et le métal.

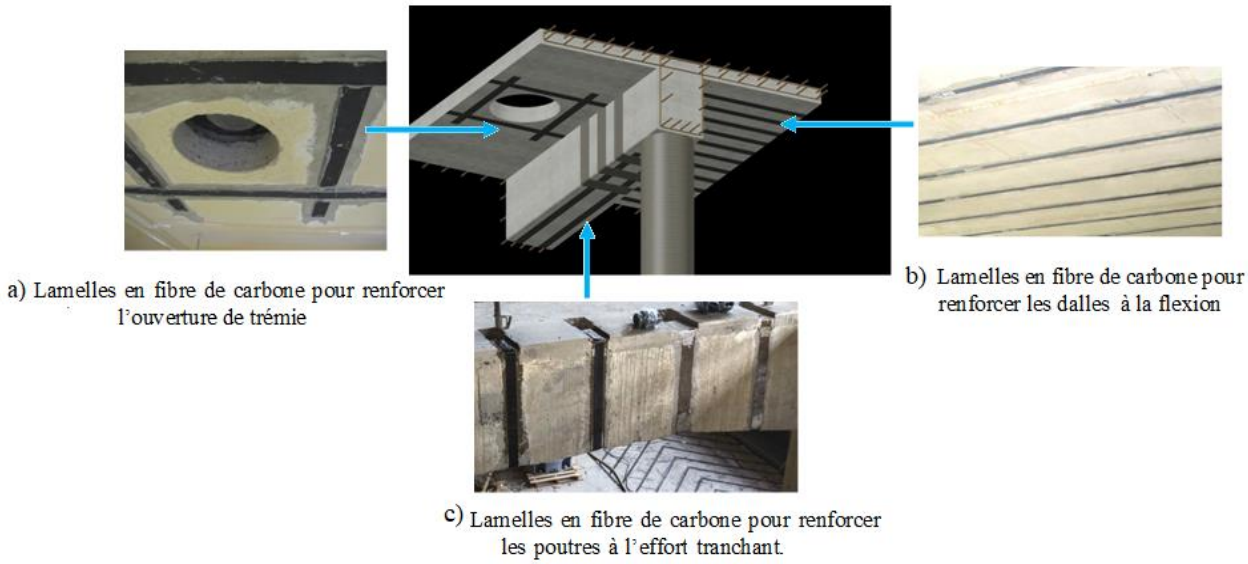


Figure II.25: Différents type de renfort en fibre de carbone.

Différentes techniques en fibre de carbone en génie civil

Il existe plusieurs types matériaux de renforcement à base de fibres de carbone, dont les principaux sont : les tissus, les lames et les mèches d'ancrage. Ces trois types sont proposés par Mapei (société italienne spécialisée dans les produits chimiques de construction).

a. Le tissu en carbone

Elément souple qui permet d'envelopper, par exemple, un poteau ou une poutre (figure II.26).

Figure II.26: Collage de tissus en carbone au niveau de la jonction entre deux poutres et un poteau. [©Mapei]

b. La lamelle en carbone

Les lamelles en carbone présentent une forme linéaire, plate et assez étroite. Elles se mettent en œuvre en sous-face de poutres ou de planchers par collage époxy (figure II.27). Elles peuvent se chevaucher pour former un quadrillage.

Figure II.27: Renforcement de la sous-face d'une poutre de pont à l'aide de lamelles en carbone. [©Mapei]

c. La mèche d'ancrage en carbone

La mèche se décompose en deux parties. D'un côté, le jonc (ensemble de fibres et de résine durcie maintenues dans une sorte de fourreau) et le fouet (ensemble de fibres libres non enduites) (figure II.28).

Figure II.28: Mèches carbone et leur mise en œuvre. [©Mapei]

Exemples d'ouvrages rénovés ou renforcés en fibre de carbone

Epsilon Composite fait partie des pionniers de ces techniques de renforcement modernes. L'entreprise fourni la plupart des grands chantiers dans le monde avec de nombreuses solutions composite. Tous les ouvrages ci-après sont surveillés par cette entreprise.

Figure II.29: Vue de Marina Bay Sands, Singapore (utilisé les nano renforts en carbone).

Le Westgate Bridge à Melbourne, un des plus grands ponts d'Australie, a été élargi en 2010. Il devient alors le plus gros projet de l'histoire de la fibre de carbone.

Figure II.30 : Vue aériennes de pont westgate à Melbourne (Australie).

Figure II.31: Exemple de chantier de rénovation de stade Santiago Bernabéu (Real Madrid) faisant appel aux solutions développées par Epsilon Composite.

Quand l'Arabie Saoudite engageait le projet d'extension du Mataf dans l'objectif d'absorber la hausse du nombre de pèlerins à la Mecque. La construction d'une passerelle démontable d'une superficie de 7 500 m² a été lancée dans un délai très rapide afin de faciliter le déplacement des pèlerins et limiter les risques de blessures dus aux mouvements de foule.

Une structure légère capable de supporter la charge occasionnée par le passage de plusieurs milliers de personnes par heure. Cet ouvrage devient le plus gros projet de l'histoire du composite carbone, devant le chantier du Westgate Bridge.

Figure II.32: Fabrication des poteaux géants et des renforts en fibre de carbone de la passerelle MATAF en Arabie Saoudite.

Figure II.33: La Symphony House de Philadelphie utilisé des panneaux muraux renforcés par une grille en fibre de carbone.

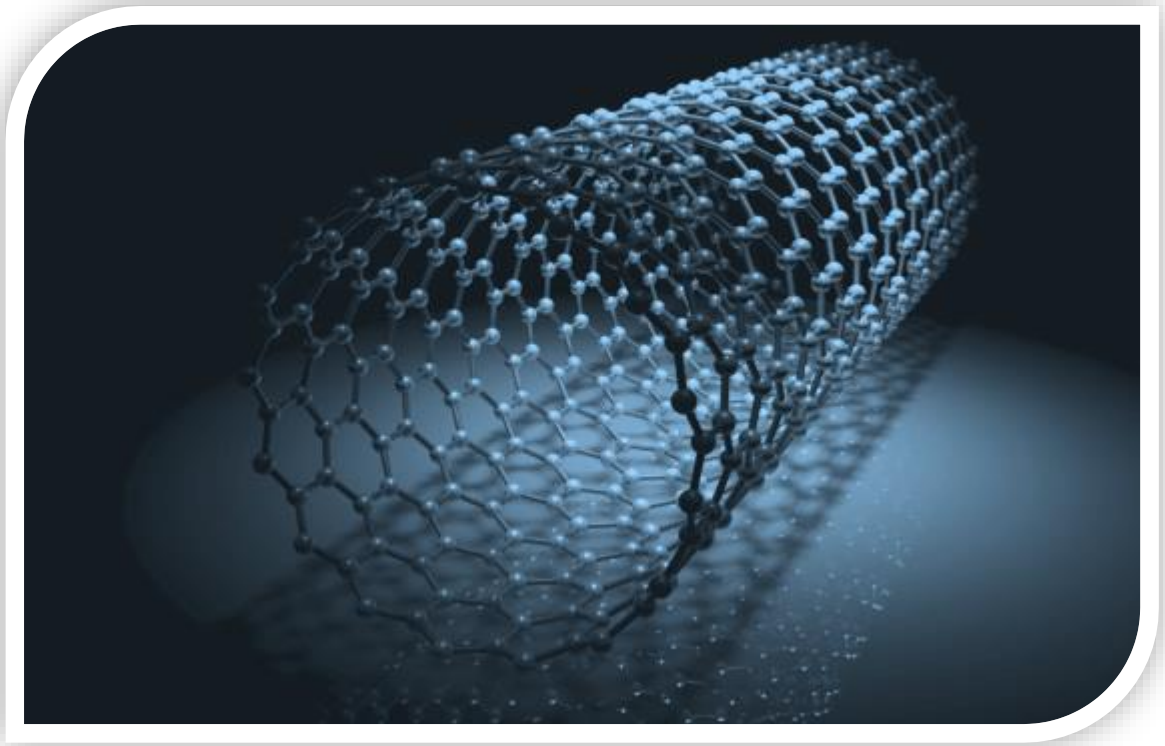
II.7. Conclusion

Ce chapitre, qui constitue une recherche bibliographique sur les nano-composites à base de polymères et renforcés par des nanotubes en carbone, a montré l'importance de ces nano-renforts tant dans le domaine des nanosciences que dans leur côté applicatif. Leurs dimensions particulières ainsi que leurs propriétés diverses ouvrent à l'industrie des perspectives d'innovations nombreuses et prometteuses.

En raison des différentes propriétés remarquables, les nanotubes de carbone font l'objet d'une attention particulière et penser qu'ils sont les candidats idéaux pour renforcer les matériaux composites à base des polymères.

CHAPITRE III :

THÉORIES ET PROPRIÉTÉS DES PLAQUES NANO-COMPOSITES



III. Théories et propriétés des plaques nano composites

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu quelques modèles sur les théories de déformation de cisaillement des plaques développées dans la littérature telles que la théorie classique de Love-Kirchhoff (CPT), la théorie du premier ordre (FSDT), la théorie d'ordre élevé (HSDT), la théorie raffinée (RPT) et la théorie Quasi-3D permettant de calculer et d'obtenir des résultats relatifs à l'étude du comportement des plaques nano-composites sous chargements. Ensuite on s'intéresse à présenter l'analyse non linéaire des plaques pour établir la relation entre la déformation et la contrainte de notre type de structure étudiée.
Alors, il est nécessaire de bien choisir la théorie qui peut décrire le comportement correct de la plaque à étudier, en tenant compte de plusieurs paramètres (la géométrie de la plaque, le type du matériau utilisé, le type des charges appliquées).

III.2. Définition des plaques

On appelle une plaque tout élément structurel de forme plane avec une épaisseur (h) assez petite comparée aux deux autres dimensions latérales (longueur b et largeur a). Elle peut être épaisse ou mince selon le rapport longueur/hauteur.

Le comportement élastique des solides soumis à des contraintes de faibles amplitudes peut évaluer par la loi de Hooke dont la réponse est proportionnelle à l'amplitude du chargement et la relation entre les contraintes $\{\sigma\}$ et les déformations $\{\varepsilon\}$ dans le repère (oxyz) en introduisant la matrice de rigidité de termes C_{ij}. Cette relation s'exprime de la manière suivante :

$$\{\sigma\} = [C].\{\varepsilon\} \quad \text{(III.1)}$$

Avec :

$\{\sigma\}$ Tenseur des contraites ;
$[C]$ Matrice d'élasticité (de rigidité) ;
$\{\varepsilon\}$ Tenseur des déformations.

Alors :

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11}\ C_{12}\ C_{13}\ C_{14}\ C_{15}\ C_{16}\\ C_{21}\ C_{22}\ C_{23}\ C_{24}\ C_{25}\ C_{26}\\ C_{31}\ C_{32}\ C_{33}\ C_{34}\ C_{35}\ C_{36}\\ C_{41}\ C_{42}\ C_{43}\ C_{44}\ C_{45}\ C_{46}\\ C_{51}\ C_{52}\ C_{53}\ C_{54}\ C_{55}\ C_{56}\\ C_{61}\ C_{62}\ C_{63}\ C_{64}\ C_{65}\ C_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{bmatrix} \quad \text{(III.2)}$$

Cette loi introduit la matrice de rigidité symétriquement qui décrit dans le cas d'un comportement linaire d'un matériau à l'aide de 21 coefficients indépendants.

Les termes de la matrice de rigidité C_{ij} sont exprimés en introduisant les coefficients de Lamé $\mu\ et\ \lambda$.

$$\lambda=\frac{\nu.E}{(1+\nu).(1-2\nu)};\ \mu=\frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{(III.3)}$$

En fonction des propriétés mécaniques du matériau constituant la plaque, on peut alors distinguer trois types suivants :

- **Plaque isotrope**

Si la plaque a des matériaux possédant un nombre infini de plan de symétrie, on dit qu'elle est isotrope. Par conséquent, ces matériaux isotropiques ont les mêmes modules d'élasticité, coefficient de Poisson, coefficient de dilatation thermique, conductivité thermique, etc. dans toutes les directions.

L'application de cette propriété au matériau unidirectionnel conduit aux relations suivantes :

$C_{11}=C_{22}$; $C_{12}=C_{23}$; $C_{66}=(C_{22}-C_{23})/2=(C_{11}-C_{12})/2$ (III.4)

$C_{11}=\lambda+2\mu$; $C_{12}=\mu$

$$[C]=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11-C_{12}}}{2} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11-C_{12}}}{2} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11-C_{12}}}{2}\end{bmatrix} \quad \text{(III.5)}$$

- **Plaque anisotrope**

On dit qu'une plaque est anisotrope, si les propriétés élastiques des matériaux constituant cette plaque sont différentes dans toutes les directions comme par exemple les structures fibreuses et les matériaux composites.
Dans ce cas, la matrice de rigidité est déterminée par 21 constantes indépendantes.

- **Plaque orthotrope**

Les plaques orthotropes sont des éléments dont les propriétés élastiques des matériaux sont différentes dans deux directions perpendiculaires, c'est le cas des tissus noyés dans un polymère. Les propriétés géométriques reduisent alors le nombre des constantes indépendantes pour décrire le comportement du matériau considéré. La matrice de rigidité se résume à l'expression suivante :

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad \text{(III.6)}$$

III.3. Différentes théories de déformation des plaques monocouches

III.3.1. Théorie classique des plaques minces de Love-Kirchhoff (CPT Classical PlateTheory)

La théorie classique des plaques minces (CPT) est la plus simple et plus générale. Elle est basée sur les hypothèses de Love- Kirchhoff suivante ([*Kirchhoff, 1850*], [*Love, 1927*]) (figure III.1):

- Les sections perpendiculaires au plan moyen de la plaque restent normales lors de la déformation en négligeant les effets de déformation de cisaillement transverse ($\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0$).
- L'épaisseur est faible, en conséquence, les contraintes dans le sens de l'épaisseur sont supposées nulles ($\sigma_z = 0$).

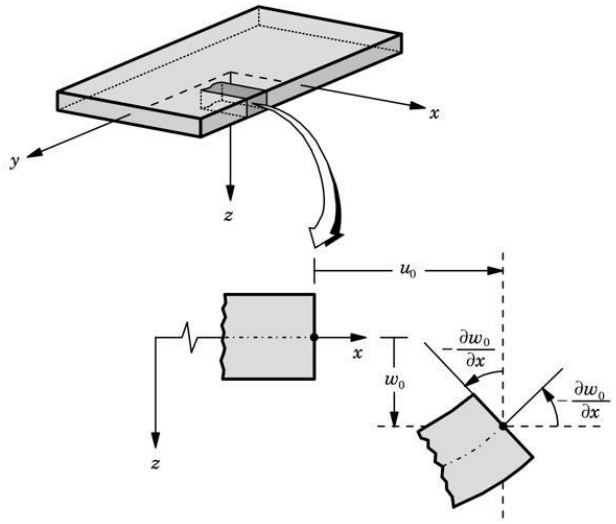


Figure III.1 : Illustration de la plaque de Love-Kirchhoff. [*Kirchhoff, 1850*]

Ces hypothèses s'inspirent de celles d'Euler-Bernoulli pour les poutres et le problème peut être alors réduit à une analyse bidimensionnelle ou' le champ de déplacement imposé s'écrit sous la forme suivante :

$$u(x,y,z) = u_0(x,y) - z\frac{\partial w_0}{\partial x}$$
$$v(x,y,z) = v_0(x,y) - z\frac{\partial w_0}{\partial y} \qquad \text{(III.7)}$$
$$w(x,y,z) = w_0(x,y)$$

Avec :

u_0 et v_0 sont les déplacements de membrane dans les directions **x** et **y** respectivement.

w_0 est la flèche de la plaque.

$\frac{\partial w_0}{\partial x}$ et $\frac{\partial w0}{\partial y}$ sont les rotations dues la flexion (sans cisaillement).

Il est noté que La théorie de Kirchhoff présentée précédemment, donne des résultats imprécis pour les plaques épaisses, puisqu'elle ne tient pas en compte l'effet de cisaillement transverse. Cela conduit plusieurs chercheurs à développer d'autres théories pour prendre ces effets en compte.

III.3.2. Théorie de déformation de cisaillement du premier ordre (FSDT First Order Shear Deformation Theory)

Contrairement à la théorie classique des plaques (CPT), la théorie de déformation de cisaillement du premier ordre (FSDT), proposée par Mindlin [*Mindlin, 1951*] et Reissner [*Reissner, 1945*], prend en considération l'effet de cisaillement transversal (figure III.2). Dans ce cas les déformations sont constantes suivant toute l'épaisseur de la plaque et les contraintes de cisaillement sont donc uniformes. Cette mauvaise description des contraintes dans le sens transverse oblige l'introduction des facteurs de correction de cisaillement pour compenser cette erreur [*Whitney, 1973*]. La valeur de ce facteur de correction dépend de plusieurs paramètres : la géométrie de la plaque, la variation du coefficient de Poisson à travers l'épaisseur, la charge appliquée et les conditions aux limites imposées.

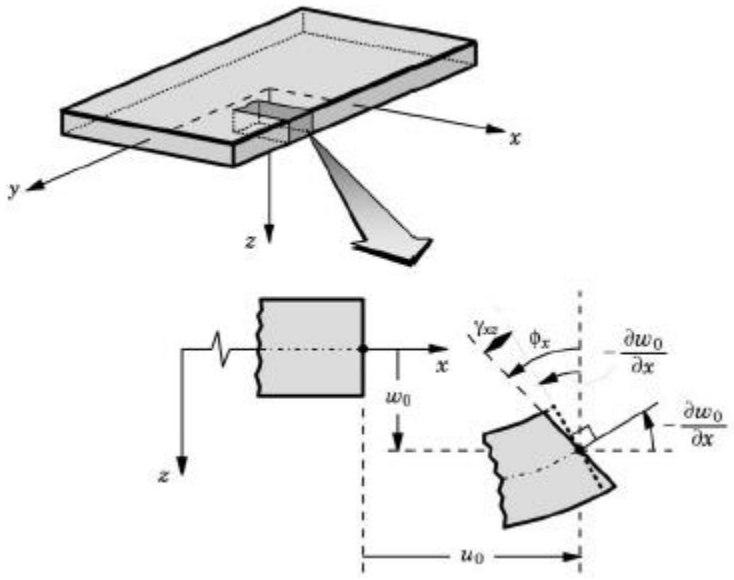


Figure III.2 : Illustration de la plaque de Reissner-Mindlin. [*Reddy, 1997*].

Le champ de déplacement de la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre est donné par :

$$\begin{aligned} u(x,y,z) &= u_0(x,y) - z\emptyset_x(x,y) \\ v(x,y,z) &= v_0(x,y) - z\emptyset_y(x,y) \\ w(x,y,z) &= w_0(x,y) \end{aligned} \qquad \text{(III.8)}$$

Avec :

u_0 et v_0 sont les déplacements de membrane dans les directions **x** et **y** respectivement.

w_0 est la flèche de la plaque.

$\emptyset_x$ et $\emptyset_y$ sont les rotations de la normale au plan moyen autour des axes **x** et **y** respectivement.

$(\emptyset_x = \frac{\partial w0}{\partial x} , \emptyset_y = \frac{\partial w0}{\partial y})$.

Pour améliorer cette théorie et éviter l'introduction d'un facteur de correction, des théories de déformation en cisaillement d'ordre élevé ont été développées.

III.3.3. Théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé (HSDT Higher Shear Deformation Theory)

La théorie de déformation en cisaillement d'ordre supérieur (HSDT) est une évolution des deux théories précédentes (CPT, FSDT). Elle est basée sur une distribution non linéaire des champs dans l'épaisseur de la plaque (figure III.3) en tenant en compte des effets de la déformation transversale de cisaillement et/ou de la déformation normale transversale, et ne demande pas d'utilisation des facteurs de correction.

Plusieurs théories d'ordre supérieur ont été proposées dans la littérature ([*Rebai, 2021*], [*Akavci, 2015*], [*Xiang, 2009*], [*Grover, 2013*], [*Matsunaga, 2009*], [*Vinyas, 2020*], [*Zaoui, 2020*], [*Adhikari, 2020*], [*Bourihane, 2020*] …) qu'elles sont basées sur le développement du champ de déplacement, en utilisant la série de Taylor, sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} u(x,y,z) &= u_0(x,y) - z\frac{\partial w_0}{\partial x} + f(z)\varphi_x(x,y) \\ v(x,y,z) &= v_0(x,y) - z\frac{\partial w_0}{\partial y} + f(z)\varphi_y(x,y) \\ w(x,y,z) &= w_0(x,y) \end{aligned} \qquad \text{(III.9)}$$

Avec :

u_0 et v_0 sont les déplacements de membrane dans les directions **x** et **y** respectivement.

w_0 est la flèche de la plaque.

$\emptyset_x$ et $\emptyset_y$ sont les rotations de la normale au plan moyen autour des axes x et y respectivement.($\varphi_x = \frac{\partial w0}{\partial x} + \emptyset_x , \varphi_y = \frac{\partial w0}{\partial y} + \emptyset_y$).

$f(z)$ est une fonction de cisaillement (fonction de forme) transverse caractérisant les théories correspondantes.

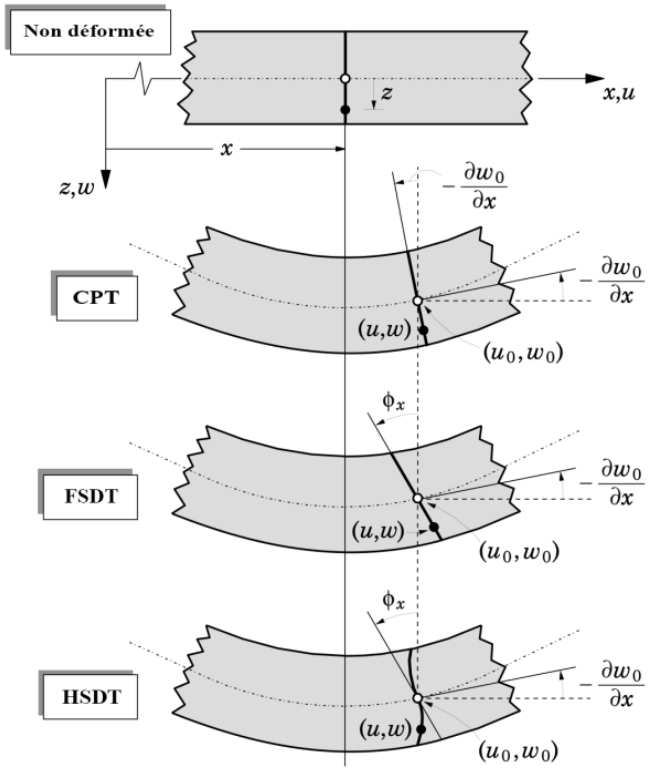


Figure III.3: Comparaison entre la théorie HSDT, FSDT et CPT.

III.3.4. Théorie raffinée des plaques RPT (Rafined Plate Theory)

Dans le but de traiter les problèmes des HSDT en diminuant le nombre des variables utilisées dans les équations d'équilibre et sans l'introduction de facteurs de correction de cisaillement, Shimpi [*Shimpi, 2002*] a développé une nouvelle théorie raffinée de déformation de cisaillement pour les plaques isotropes (RPT). Plusieurs théories de déformation de cisaillement ont été démontrées pour le cas de la flexion ([*Kim, 2009*], [*Ait Atmane, 2010*], [*Bellifa, 2016*], [*Shahsavari, 2017*], [*Zine, 2020*]), pour le cas du flambage ([*Thai, 2011*], [*Thai, 2013*], [*Bellifa, 2017*] , ([*Bouazza, 2018*], ([*Bouazza, 2020*], ([*Belarbi, 2021*]) et pour le cas de la vibration ([*Hadji, 2011*], [*Bennoun, 2014*], [*Rahmani, 2020*], [*Amabili, 2020*]).
Le champ de déplacement proposé par cette théorie est :

$$u(x,y,z) = u_0(x,y) - z\frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z)\frac{\partial w_s}{\partial x}$$
$$v(x,y,z) = v_0(x,y) - z\frac{\partial w_b}{\partial y} - f(z)\frac{\partial w_s}{\partial y} \qquad \text{(III.10)}$$
$$w(x,y,z) = w_b(x,y)+w_s(x,y)$$

Où u_0 et v_0 sont les déplacements de membrane dans les directions **x** et **y** respectivement.

w_b et w_s sont les composantes de flexion et de cisaillement du déplacement transversal respectivement.

$f(z)$ est une fonction de cisaillement transverse.

III.3.5. Théorie de déformation des plaques Quasi-3D

Dans cette nouvelle théorie Quasi-3D et contrairement à d'autres théories précédentes, le déplacement transversal est divisé en trois composants en introduisant l'effet d'étirement de l'épaisseur de la plaque, comme il est présenté dans le champ des déplacements suivant :

$$\begin{aligned} u(x,y,z) &= u_0(x,y) - z\frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z)\frac{\partial w_s}{\partial x} \\ v(x,y,z) &= v_0(x,y) - z\frac{\partial w_b}{\partial y} - f(z)\frac{\partial w_s}{\partial y} \\ w(x,y,z) &= w_b(x,y)+w_s(x,y)+w_{st}(x,y,z) \end{aligned} \qquad \text{(III.11)}$$

Où $w_{st}(x, y, z) = g(z)\,\varphi(x, y, z)$ est le terme qui exprime l'étirement de l'épaisseur.

Plusieurs chercheurs ont utilisé ce type de théories pour étudier les différents comportements des structures composites. On cite par exemple :

- Zenkour a développé des nouvelles théories quasi-3D a quatre inconnues pour différents types de plaques : FGM [*Zenkour, 2013*], pour les plaques sandwich [*Zenkour, 2013*] et les plaques composites stratifiées [*Zenkour, 2015*]. Il y a aussi Mantari [*Mantari, 2014*] et [*Khiloun, 2020*] qui ont développé une théorie quasi -3D à quatre inconnues pour l'analyse de comportement des plaques et des coques FG.
- Addou [*Addou, 2019*] et Kaddari [*Kaddari, 2020*] ont développé un nouveau modèle quasi-3D pour étudier sur le comportement structurel des plaques poreuses fonctionnellement graduées sur une fondation élastique.
- D'autres chercheurs ont proposé différentes fonctions de forme des théories quasi-3D à cinq variables au lieu de six variables tels que [*Thai, 2013*], [*Tounsi, 2013*], [*Bessaim, 2013*], [*Hebali, 2014*], [*Bennoun, 2016*], [*Abdelaziz, 2017*], [*Benahmed, 2017*], [*Benchohra, 2018*], [*Bouhadra, 2018*], [*Meksi, 2018*], [*Abualnour, 2018*], [*Hamidi, 2018*], [*Shahsavari, 2018*], [*Belkhodja,2020*].

III.4. Différents modèles des théories de déformation

Le tableau ci-après (tableau III.1) résume différentes approches trouvées dans la littérature, pour la fonction de gauchissement $f(z)$:

Tableau III.1 : Différents modèles des théories de déformation.

Théories et auteurs	Fonctions de forme f(z)
Kirchhoff (CPT)	0
Mindlin (FSDT)	Z
Ambarsumian (HSDT) (1958)	$\frac{1}{2} z \left(\frac{1}{4} h^2 - \frac{1}{3} z^2 \right)$
Reissner (HSDT) (1975)	$\frac{5}{4} z \left(1 - \frac{4}{3} \frac{z^2}{h^2} \right)$
Touratier (TSDPT) (1991)	$\frac{h \sin\left(\frac{\pi z}{h} \right)}{z}$
Karama Afaq et Mistou (ESDPT) (2003)	$z \, e^{-\frac{2 z^2}{h^2}}$
Levinson, Reddy (PSDPT) (1997)	$z \left(1 - \frac{4}{3} \frac{z^2}{h^2} \right)$
Thai (HSDT) (2014)	$h \sinh\left(\frac{z}{h} \right) - z \cosh\left(\frac{1}{2} \right)$
El Meiche (HSDT) (2011)	$\frac{\frac{h \sin\left(\frac{h z}{\pi} \right)}{z} - z}{\cosh\left(\frac{1}{2} \pi \right) - 1}$
Ait Atmane (HSDT) (2010)	$\frac{z \cosh\left(\frac{1}{2} \pi \right) - \frac{h \sinh\left(\frac{\pi z}{h} \right)}{\pi}}{\cosh\left(\frac{1}{2} \pi \right) - 1}$
Nguyen (HSDT) (2007)	$sinh^{-1}\left(\frac{3z}{h}\right) - z(\frac{6}{h\sqrt{13}})$

Mantari (HSDT) (2012)	$\sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) e^{m\cosh\left(\frac{\pi z}{h}\right)}$; m constant
Mantari and Okten &soares (HSDT) (2012)	$\tan(m z)$; m constant
Mantari and Soares (HSDT) (2013)	$\sin\left(\frac{z}{h}\right) e^{m\cosh\left(\frac{z}{h}\right)}$; m constant
Sahoo and singh (HSDT) (2013)	$cotan^{-1}\left(\frac{rh}{z}\right) - \frac{4r}{h(4r^2+1)}$; $r = 0.46$
Mahi et al. (HSDT) (2015)	$\frac{1}{2} h \tanh\left(\frac{2z}{h}\right) - \frac{4}{3} \frac{z^3}{h^2 \cosh(1)^2}$
Cukanovi (HSDT) (2018)	$z\left(\cosh\left(\frac{z}{h}\right) - 1.388\right)$

III.5. Analyse non linéaire des plaques

III.5.1. Introduction

La première question qui vient à l'esprit d'un étudiant habitué aux calculs linéaires élastiques et désirant entreprendre une analyse non linéaire est : c'est quoi une non linéarité ?

Afin d'expliquer les systèmes non linéaires, il est nécéessaire en premier lieu de définir ce qu'est un système linéaire. Un système linéaire est un systéme dont la relation entre les charges appliquées (inputs) et la réponse induite (outputs) est linéaire.Quand un chargement est doublé,la reponse (déplacements, déformations, contraintes, forces de réaction, etc.) sera aussi doublée (voir figure III.4**)**. Donc, il n'est pas nécessaire de calculer la structure encore une fois quand un autre chargement est appliqué. Cette analyse linéaire est basée sur des hypothèses statiques et de linéarité et est, par conséquent, valide aussi longtemps que ces hypothèses le sont. Lorsque l'une (ou plusieurs) de ces hypothèses n'est plus vérifiée, l'analyse linéaire produit des prévisions erronées et les analyses non linéaires doivent être utilisées pour modeler les non linéarités.

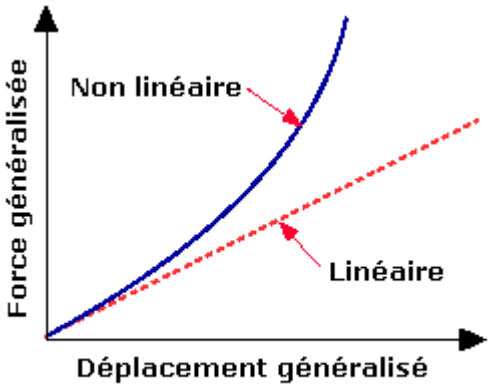


Figure III.4 : Relation entre les charges appliquées et les déplacements induits.

L'hypothèse de linéarité est vraie si :

- Tous les matériaux utilisés dans le modèle vérifient la loi de Hooke, c'est-à-dire que la contrainte calculée est directement proportionnelle à la déformation. Certains matériaux présentent ce comportement uniquement si les déformations sont faibles. A mesure que les déformations augmentent, les relations contrainte-déformation deviennent non linéaires. Certains matériaux présentent un comportement non linéaire et cela même lorsque les déformations sont faibles. Un modèle de matériau est une simulation mathématique du comportement d'un matériau. L'analyse linéaire peut être utilisée pour analyser les modèles avec des matériaux linéaires, en supposant qu'il n'existe pas d'autres types de non linéarité. Les matériaux linéaires peuvent être isotropiques, orthotropiques ou anisotropiques. Chaque fois qu'un matériau du modèle manifeste un comportement contrainte-déformation non linéaire sous un chargement spécifié, l'analyse non linéaire doit être utilisée. L'analyse non linéaire offre plusieurs types de modèles de matériaux.
- Les déplacements induits sont suffisamment petits pour ignorer les changements engendrés par le chargement sur la matrice de raideur. L'analyse non linéaire offre une option de grande déformée lors de la définition des propriétés de matériaux d'un composant volumique ou d'une coque. Les calculs de matrice de raideur peuvent être réeffectués à chaque pas de simulation. La fréquence du recalcul de la matrice de raideur est contrôlée par l'utilisateur.
- Les conditions aux limites ne varient pas pendant l'application des chargements. Le chargement doit être constant dans le temps en intensité, direction et distribution. Il ne doit pas changer sous l'effet de la déformation du modèle. A titre d'exemple, les problèmes de contact sont naturellement non linéaires puisque les conditions aux limites changent

lors du contact de chargement. Toutefois, l'analyse linéaire offre une solution approximative pour les problèmes de contact où l'effet des grandes déformations est pris en compte.

III.5.2. Différents types de comportement non linéaire

Les sources principales de non linéarités structurelles rencontrées dans des applications pratiques sont les suivantes :

III.5.2.1. Non linéarité géométrique

Dans une analyse d'éléments finis non linéaires, une source majeure de non linéarité provient de l'effet de grands déplacements sur la configuration géométrique globale des structures. Les structures subissant de grands déplacements peuvent avoir d'importants changements dans leur géométrie en raison des déformées induites par le chargement, ce qui entraîne la structure à répondre non linéairement. Alors, pour les problèmes linéaires, la relation entre la déformation et le déplacement est linéaire. Par exemple, pour une poutre bidimensionnelle, cette relation peut être écrite sous la forme :

$$[\varepsilon_l]=\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \qquad \text{(III.12)}$$

Si le déplacement est doublé, la déformation sera aussi doublée, ce qui est une proprieté fondamentale de l'analyse linéaire. Cette relation est valable uniquement si le déplacement et son gradient sont infinitésimaux. Lorsque ces quantités deviennet larges, la relation précedente n'est pas exacte et la définition suivante de la déformation doit être introduite :

$$[\boldsymbol{\varepsilon_{nl}}] = \underbrace{\frac{[\varepsilon_l]^T + [\varepsilon_l]}{\mathbf{2}}}_{\textit{terme linéaire}} + \underbrace{\frac{[\varepsilon_l]^T.[\varepsilon_l]}{\mathbf{2}}}_{\textit{terme non linéaire}} \qquad \text{(III.13)}$$

Où $[\boldsymbol{\varepsilon_{nl}}]$ est le tenseur de déformation de Green-Lagrange.

En substituant l'équation (III.12) dans l'équation (III.13) on peut écrire :

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \dfrac{\partial u}{\partial x} + \dfrac{1}{2}\left[\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\dfrac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right] \\ \varepsilon_{zz} = \dfrac{\partial w}{\partial z} + \dfrac{1}{2}\left[\left(\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right] \\ \varepsilon_{xz} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u}{\partial z} + \dfrac{\partial w}{\partial x}\right) + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}.\dfrac{\partial u}{\partial z} + \dfrac{\partial w}{\partial x}.\dfrac{\partial w}{\partial z}\right) \end{cases} \quad \text{(III.14)}$$

La théorie de la non-linéarité géométrique des plaques est appelée aussi la théorie des grandes déformations de **Von Karman** [*Von Karman, 1910*].

III.5.2.2. Non linéarité matérielle

La non linéarité matérielle représente le cas où la relation entre la déformation et la contrainte est non linéaire. Cette relation est souvent appelée relation constitutive. Pour les systèmes linéaires, cette relation s'écrit comme :

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad \text{(III.15)}$$

Où [D] est la matrice des modules d'élasticité. Du fait que [D] est constante, la relation entre la déformation et la contrainte est linéaire. Si la déformation est doublée, la contrainte sera aussi doublée. Cette relation représente un comportement géneral des matériaux élastiques sous déformations infinitésimales. Quand la relation contrainte-déformation ne peut être représentée par une matrice constante, il est considéré comme un matériau non linéaire. Dans un tel matériau, le module élastique dépend de l'état actuel de déformation. Dans certains cas, il dépend aussi de l'historique des chargements (comme dans les problèmes de plasticité), de la durée du chargement (comme dans les analyses de fluage) et de la température (comme en matière de thermo-plasticité).

III.5.2.3. Non linéarité cinématique : problème de contact

La non-linéarité cinématique est également appelée non-linéarité de la frontière, car les conditions aux limites du déplacement dépendent des déformations de la structure. En général, les équations structurelles résolvent pour des déplacements inconnus dans le domaine avec des charges appliquées données et des conditions aux limites de déplacement prescrites. Lorsque les conditions aux limites changent en fonction des déplacements, les déplacements

et les conditions aux limites sont inconnues. Dans ce cas, L'effet de la non-linéarité sur le comportement des structures est une considération importante dans cette analyse.

III.5.2.4. Non linéarité de force

Similaire à la non linéarité cinématique, la non linéarité des forces se produit lorsque les forces appliquées dépendent de la déformation. La force étant un vecteur, sa magnitude et / ou sa direction peuvent changer en fonction de la déformation d'une structure. La non-linéarité de la force est souvent accompagnée d'une non-linéarité géométrique.

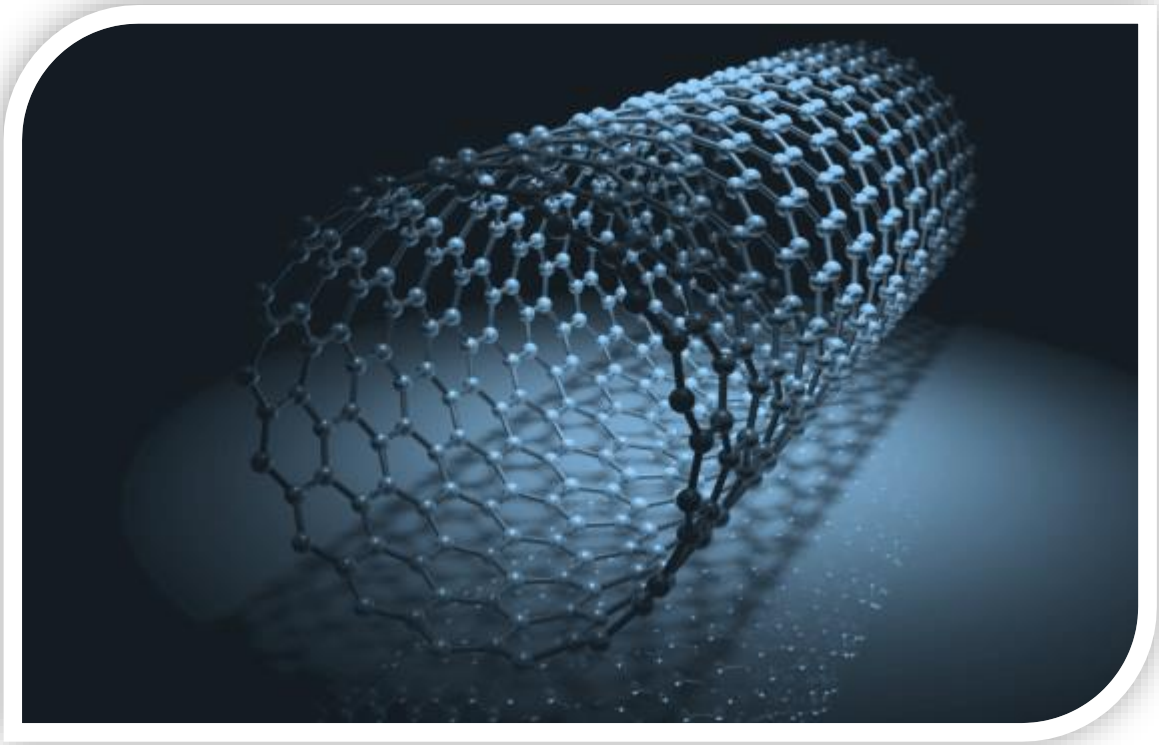
III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différentes théories des plaques de la théorie classique aux théories d'ordre élevé quasi-3D. Une comparaison de ces théories a été faite pour décrire la déformation de cisaillement des plaques.

En général, il est rare de trouver une théorie qui serait applicable à tous les cas possibles (matériau composite anisotrope, isotrope, stratifié, sandwich …etc) et aux différents phénomènes étudiés (statique, dynamique, flambement, …etc), et qui serait en plus simple et facile et ne coûte pas trop en temps de calcul, car chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients, avec des formulations qui diffèrent selon le domaine d'application. Le comportement non linéaire en flexion cylindrique des plaques basé sur la théorie des grandes déformations de Von Karman a été aussi présenté pour établir la relation entre les contraintes et les déformations.

CHAPITRE IV :

ETUDE DU COMPORTEMENT NON LINÉAIRE DES PLAQUES FG-CNTRS



IV. Etude du comportement non linéaire des plaques FG-CNTRs

IV.1. Introduction

Actuellement, les travaux sur les composites renforcés par des nanotubes de carbone sont devenus un point très important dans la recherche scientifique. Plusieurs recherches ont montré que les nanotubes de carbone (CNTs) possèdent des propriétés mécaniques, électriques et thermiques exceptionnelles dans les composites de matrice de polymère et que l'addition d'un pourcentage de ces renforts peut considérablement améliorer les propriétés des composés polymères.

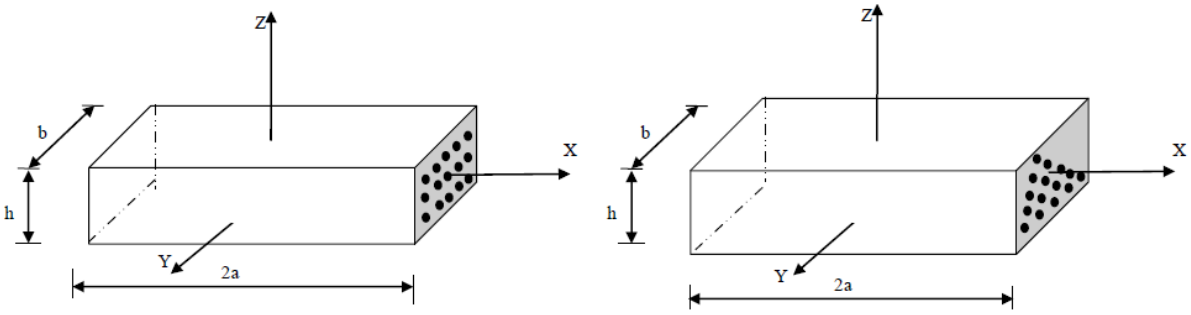
L'objectif de cette recherche est de présenter une solution analytique non linéaire des plaques FG-CNTCRs qu'ayant un rapport longueur sur largeur est assez élevé un tel comportement est appelé "flexion cylindrique" et soumise à un chargement transversal. La théorie d'ordre élevée des plaques (HSDT) et les déformations non linéaires du type Von Karman sont utilisées pour déterminer les équations régissantes en incluant des effets thermiques. Des résultats numériques sont présentés pour montrer l'influence des propriétés du matériau, la géométrie de la plaque et le chargement mécanique sur le résultat de la déformée et contrainte non linéaire des plaques composites renforcées par des nanotubes de carbone à gradient de propriétés (FG-CNTCRs) dans un environnement thermique.

IV.2. Formulations théoriques

IV.2.1. Propriétés matérielles à gradient de propriétés des plaques CNTRC

Considérons une plaque composite renforcée par des nanotubes de carbone (CNTRC) infiniment longue dans la direction y avec une largeur (L = 2a) et une épaisseur uniforme (h) (voir figure IV.1). On suppose que les plaques étudiées sont renforcées par deux types différents de distribution alignée de nanotubes de carbone sur toute l'épaisseur : une

distribution uniforme UD-CNT et fonctionnellement graduée FG-CNT comme indiqué sur la figure IV.1.a et la figure IV.1.b, respectivement.



(a) UD-CNT (b) FG-CNT

Figure IV.1 : Géométrie des plaques composites renforcées par des nanotubes de carbone.

Les propriétés matérielles du mélange de CNT et d'un polymère isotrope, telles que le module de Young, la densité massique, le coefficient de Poisson et le coefficient thermique, peuvent être estimées selon la loi de mélange et donnés par ([*Shen, 2009*] et [*Zhu, 2012*]) :

$$E_{11} = \eta_1 V_{CN} E_{11}^{CN} + V_m E^m \tag{IV.1a}$$

$$\frac{\eta_2}{E_{22}} = \frac{V_{CN}}{E_{22}^{CN}} + \frac{V_m}{E^m} \tag{IV.1b}$$

$$\frac{\eta_3}{G_{12}} = \frac{V_{CN}}{G_{12}^{CN}} + \frac{V_m}{G^m} \tag{IV.1c}$$

$$\alpha_{11} = V_{CN}\alpha_{11}^{CN} + V_m\alpha^m \tag{IV.1d}$$

$$\alpha_{22} = (1+\nu_{12}^{CN})V_{CN}\alpha_{22}^{CN} + (1+\nu^m)V_m\alpha^m - \nu_{12}\alpha_{11} \tag{IV.1e}$$

Où $E_{11}^{CN}, E_{22}^{CN}, G_{12}^{CN}, \alpha_{11}^{CN} et\ \alpha_{22}^{CN}$ sont les modules de Young, modules de cisaillement et les coefficients de dilatation thermique du nanotube de carbone, et E^m, G^m et α^m correspondent aux propriétés de la matrice. ν_{12}^{CN} et ν^m sont les coefficients de Poisson, du nanotube de carbone et de matrice, respectivement.

Pour expliquer la dépendance des propriétés du matériau Eq.(IV.1), on introduit des paramètres d'efficacité du CNT η_j $(j = 1,2,3)$ et seront donnés plus tard en faisant correspondre le module d'élasticité du CNTRC observé à partir des résultats de simulation de dynamique moléculaire MD avec les résultats numériques obtenus à partir de la loi de mélange.

$V_{CN} et\, V_m$ sont les fractions volumiques des nanotubes de carbone et de la matrice, respectivement et sont donnés par :

$$V_{CN} + V_m = 1 \tag{IV.2a}$$

La fraction volumique V_{CN} peut être exprimée comme [*Shen, 2009*]:

Pour les plaques UD-CNT **Pour les plaques FG-CNT**

$$V_{CN} = V_{CN}^* \qquad V_{CN} = \left(1 - \frac{2z}{h}\right) V_{CN}^* \tag{IV.2b}$$

Où V_{CN}^* est la fraction volumique de CNT donnée, qui peut être obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{CN}^* = \frac{W_{CN}}{W_{CN} + (\rho_{CN} / \rho_m)(1 - W_{CN})} \tag{IV.2c}$$

W_{CN} est la fraction massique du nanotube de carbone et ρ_{CN} et ρ_m sont les densités de nanotube de carbone et la matrice, respectivement.

Il reste le coefficient de Poisson qu'est donné par :

$$\nu_{12} = V_{CN}^* \nu_{12}^{CN} + V_m \nu^m \tag{IV.2d}$$

IV.2.2. Relations Déformation-Déplacement

Dans cette partie, nous allons décrire les équations fondamentales en analyse en grand déplacement des plaques FG-CNTRC d'épaisseur constante h soumise à un chargement transversal combiné avec un chargement thermique en basant sur la théorie d'ordre élevée (HSDT) et la théorie des grandes déformations de Von-Karman. En utilisant ces théories, le

champ des déplacements en un point quelconque de coordonnées (*x*, *z*) dans le cas de la flexion cylindrique est présenté sous la forme suivante :

$$\begin{cases} u(x,z) = u_0(x) - z\dfrac{\partial w_0}{\partial x} + k_1 f(z)\int \theta(x)\,dx \\ w(x,z) = w_0(x) \end{cases} \tag{IV.3}$$

Dans lesquels (u_0, w_0, θ) présentent les trois déplacements inconnus du plan médian de la plaque et le coefficient k_1 dépend de la géométrie.

Dans notre travail, la fonction de forme est considérée d'après ([*Kaczkowski, 1968*], [*Panc, 1975*] et [*Reissner, 1975*]) et donnée par :

$$f(z) = \frac{5z}{4}\left(1 - \frac{4z^2}{3h^2}\right) \text{ and } g(z) = f'(z) \tag{IV.4}$$

Les relations (déformations-déplacements) non-linéaires basées sur l'hypothèse de Von-Karman sont données par ([*Reddy, 1997*] et [*Bhaskar, 2014*]):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \varepsilon_x^0 + zk_x^b + f(z)k_x^s \\ \gamma_{xz} &= g(z)\gamma_{xz}^s \end{aligned} \tag{IV.5}$$

Avec :

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2,\ k_x^b = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}, \tag{IV.6}$$

$$k_x^s = k_1\theta,\quad \gamma_{xz}^s = k_1 A'\frac{\partial \theta}{\partial x}$$

L'intégrale ($\int \theta\,dx$) mentionnée dans les équations précédentes doit être résolue par la solution de Navier et obtenue par :

$$\int \theta\,dx = A'\frac{\partial \theta}{\partial x} \tag{IV.7}$$

Où les coefficients A' et k_1 sont définis en fonction du type de la méthode employée.

Dans ce cas, en utilisant la solution Navier, ces termes sont donnés par :

$$A' = -\frac{4a^2}{\pi^2},\ k_1 = \frac{\pi^2}{4a^2} \tag{IV.8}$$

IV.2.3. Relations Constitutives

Les relations constitutives peuvent être exprimées comme suit [*Avcar, 2019*] :

$$\sigma_{xx} = Q_{11}\left(\varepsilon_x - \alpha_{11}\Delta T\right), \quad \tau_{xz} = Q_{55}\gamma_{xz} \tag{IV.9}$$

Où $\Delta T = T - T_0$ la variation de la température et T_0 la température de référence pour la quelle les déformations thermiques sont considérés comme étant égales à zéro.

En utilisant les propriétés matérielles définies dans l'équation (IV.1), les coefficients de rigidité peuvent être écrits comme :

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, \; Q_{55} = G_{12} \tag{IV.10}$$

IV.2.4. Équations de mouvement

Les équations de mouvement de l'analyse non linéaire des plaques composites renforcées par nanotube de carbone en flexion cylindrique par la théorie HSDT peuvent être dérivées en utilisant le principe de l'énergie de Hamilton. Il peut s'écrire sous la forme suivante ([*Alnujaie, 2021*], [*Selmi, 2020*] et [*Attia, 2018*]):

U+V=0 (IV.11)

Où U est l'énergie de déformation et V est l'énergie potentielle de la plaque.

L'énergie de déformation (U) est définie comme :

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{U} &= \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{2}}\int_{-a}^{a}\int_{-h/2}^{h/2}\left(\boldsymbol{\sigma}_x\left(\boldsymbol{\varepsilon}_x - \boldsymbol{\varepsilon}_x^T\right) + \boldsymbol{\tau}_{xz}\boldsymbol{\gamma}_{xz}\right)\boldsymbol{dxdz} \\
\boldsymbol{U} &= \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{2}}\int_{-a}^{a}\Big[\boldsymbol{A}_{11}\left(\boldsymbol{\varepsilon}_x^0\right)^2 + \boldsymbol{2\varepsilon}_x^0\boldsymbol{B}_{11}\boldsymbol{k}_x^b + \boldsymbol{D}_{11}\left(\boldsymbol{k}_x^b\right)^2 + \boldsymbol{H}_{11}^s\left(\boldsymbol{k}_x^s\right)^2 \\
&\boldsymbol{+2}\left(\boldsymbol{\varepsilon}_x^0\boldsymbol{B}_{11}^s\boldsymbol{k}_x^s + \boldsymbol{D}_{11}^s\boldsymbol{k}_x^s\boldsymbol{k}_x^b\right)\boldsymbol{-2}\left(\boldsymbol{\varepsilon}_x^0\boldsymbol{N}_x^T + \boldsymbol{k}_x^b\boldsymbol{M}_x^T + \boldsymbol{k}_x^s\boldsymbol{S}_x^T\right)\Big] \\
&\boldsymbol{+A}_{55}^s\left(\boldsymbol{\gamma}_{xz}^s\right)^2\Big]\boldsymbol{dx} + \int_{-a}^{a}\int_{-h/2}^{h/2}\boldsymbol{Q}_{11}\left(\boldsymbol{\varepsilon}_x^T\right)^2\boldsymbol{dzdx}
\end{aligned} \tag{IV.12}$$

$(A_{11}, B_{11}, D_{11}, B_{11}^s, D_{11}^s, H_{11}^s, A_{55}^s)$ sont les composantes de rigidité de la plaque définies par :

$$(A_{11}, B_{11}, D_{11}, B_{11}^s, D_{11}^s, H_{11}^s) = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11}(1, z, z^2, f(z), zf(z), f^2(z))dz, \; ; \; A_{55}^s = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{55}\left[g(z)\right]^2 dz, \tag{IV.13}$$

Les résultantes de contrainte utilisées dans l'Equation (IV.12) sont définies comme:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ M_x \\ S_x \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x \begin{Bmatrix} 1 \\ z \\ f(z) \end{Bmatrix} dz, \quad Q_{xz} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz}\, g(z) dz. \tag{IV.14.a}$$

Les charges thermiques équivalentes (N^T, M^T et S^T) sont définies par les relations

$$\left(N^T, M^T, S^T\right) = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{ij}\alpha_{jj}\Delta T(1, z, f(z))dz \tag{IV.14.b}$$

En substituant Eq. (IV.9) dans Eq. (IV.14), on obtient :

$$N_x = A_{11}\left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2\right) - B_{11}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + k_1 B_{11}^s \theta - N_x^T,\ Q_{xz} = A_{55}^s k_1 A' \frac{\partial \theta}{\partial x} \tag{IV.15.a}$$

$$S_x = B_{11}^s\left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2\right) - D_{11}^s\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + k_1 H_{11}^s \theta - S_x^T, \tag{IV.15.b}$$

$$M_x = B_{11}\left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2\right) - D_{11}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + k_1 D_{11}^s \theta - M_x^T, \tag{IV.15.c}$$

L'énergie potentielle de la plaque (*V*) sous chargement uniforme (q), est égale à :

$$V = -\int_{-a}^{a} qw(x)dx = -\int_{-a}^{a} qw_0(x)dx \tag{IV.16}$$

En additionnant l'équation (IV.12) et l'équation (IV.16), on obtient :

$$\boldsymbol{\Pi = U + V}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Pi} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{2}}\int_{-a}^{a}\Big[& \boldsymbol{A_{11}\left(\varepsilon_x^0\right)^2 + 2\varepsilon_x^0 B_{11} k_x^b + D_{11}\left(k_x^b\right)^2 + H_{11}^s\left(k_x^s\right)^2} \\ & \boldsymbol{+2\left(\varepsilon_x^0 B_{11}^s k_x^s + D_{11}^s k_x^s k_x^b\right) - 2\left(\varepsilon_x^0 N_x^T + k_x^b M_x^T + k_x^s S_x^T\right)\Big]} \\ & \boldsymbol{+A_{55}^s\left(\gamma_{xz}^s\right)^2\Big]dx + \int_{-a}^{a}\int_{-h/2}^{h/2} Q_{11}\left(\varepsilon_x^T\right)^2 dzdx - \int_{-a}^{a} qw_0(x)dx}\end{aligned} \tag{IV.17}$$

Maintenant, considérons les conditions aux limites d'une plaque FG-CNTRC simplement appuyée, le principe de l'énergie potentielle minimale est appliqué en supposant une solution

comme première estimation pour les déplacements considérés (c.à.d. u_0, w_0 et θ) sur la surface médiane de la plaque tel que l'équation (IV.18).

$$\begin{aligned} &u_0(-a) = u_0(a) = 0 \ ; \ w_0(-a) = w_0(a) = 0 \\ &M_x(-a) = M_x(a) = 0 \ ; \ \frac{\partial\theta(-a)}{\partial x} = \frac{\partial\theta(a)}{\partial x} = 0 \end{aligned} \tag{IV.18}$$

Dans cette étude, les fonctions trigonométriques pour les champs de déplacement et de rotation, qui satisfont les conditions aux limites d'une plaque simplement appuyée et renforcée par des nanotubes de carbone à paroi unique (SWCNT) pour l'analyse non linéaire en flexion cylindrique dans un environnement thermique, sont définies comme dans l'équation (IV.19).

$$\begin{aligned} &u_0(x) = C\sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \\ &w_0(x) = W_0\cos\left(\frac{\pi x}{2a}\right) \qquad\qquad \theta(x) = \theta_0\sin\left(\frac{\pi x}{2a}\right) \end{aligned} \tag{IV.19}$$

Où C, W_0 et θ_0 sont des paramètres arbitraires qui peuvent être obtenues en remplaçant Eq. (IV.19) dans Eq. (IV.17) et utilisant les équations de Lagrange indiquées ci-après :

$$\frac{\partial\Pi}{\partial(C, W_0, \theta_0)} = 0 \tag{IV.20}$$

Cette équation fournit un système de trois équations d'équilibre non linéaires à résoudre. Les constants obtenus (C, W_0 et θ_0) sont ensuite utilisés pour calculer les déplacements, les déformations et les contraintes de l'équation (IV.19), (IV.5) et (IV. 9) respectivement.

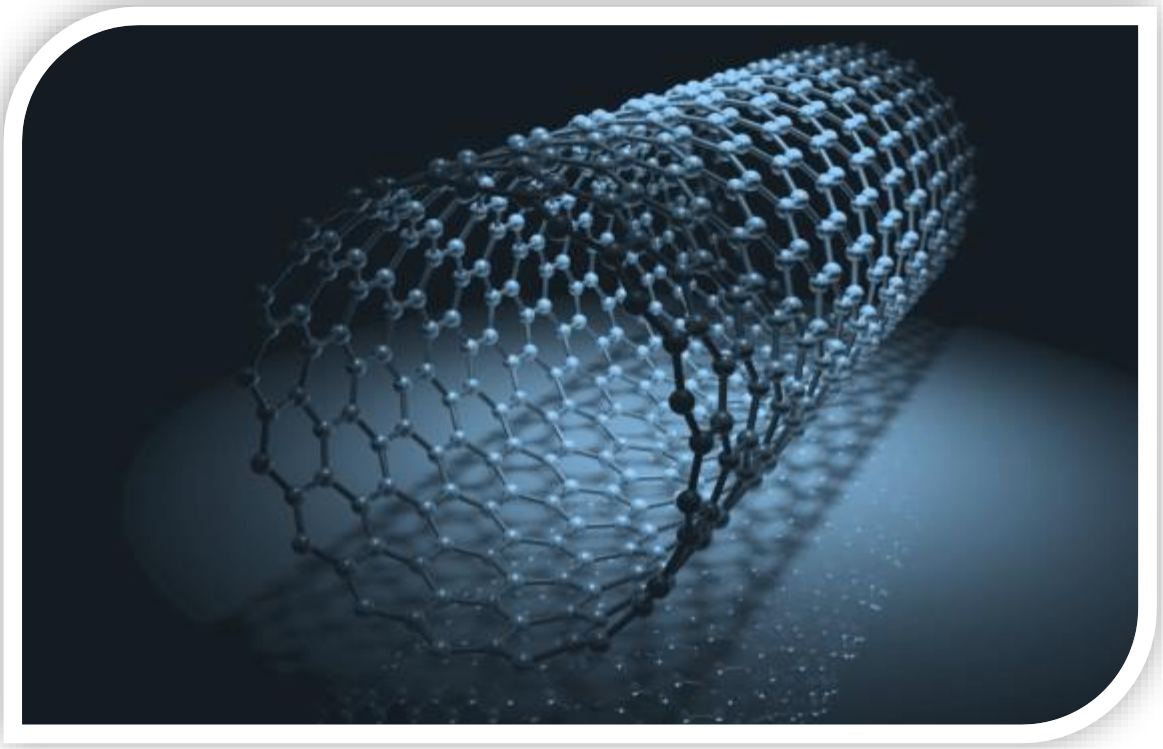
IV.3. Conclusion

Une théorie d'ordre élevé (HSDT) par intégrale simple et efficace, a été développée avec succès pour l'analyse du comportement non linéaire de plaques renforcées par des nano tubes de carbone (FG-CNTRC) avec différentes distributions des renforts. Les plaques sont soumises à une charge de pression dans un environnement thermique et leur non linéarité géométrique est introduit dans les équations déformation-déplacement en basant sur les

hypothèses de Von Karman. Le concept d'énergie avec la théorie actuelle est utilisé pour prédire la grande déflexion etl'influence de la température et la distribution des contraintes à travers l'épaisseur des plaques (FG-CNTRC). Il peut être conclu que la théorie actuelle est non seulement précise, mais aussi efficace dans la prédiction de la réponse non linéaire de la flexion cylindrique des plaques (FG-CNTRC) par rapport à d'autres théories de déformation de cisaillement des plaques.

CHAPITRE V:

RESULTATS ET DISCUSSIONS



V. Résultats et Discussions

V.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous nous concentrons sur la présentation des résultats numériques de l'analyse du comportement mécanique en flexion cylindrique de la plaque FG-CNTCR simplement appuyée soumises à un environnement thermique. Pour déterminer les résultats et montrer l'influence des propriétés du matériau, les équations de mouvement sont basées sur la théorie d'ordre élevée des plaques (HSDT) et les déformations non linéaires du type Von Karman. Ensuite, une étude paramétrique est présentée afin de mettre en évidence l'influence des différents paramètres à savoir, la géométrie de la plaque, le chargement mécanique, la distribution des nanotubes de carbone dans la matrice polymère, la non linéarité géométrique et l'effet de la température sur la réponse du système étudié.

V.2 Analyse des résultats

Les résultats numériques des comportements non linéaires en flexion cylindrique des plaques renforcées par du nanotube de carbone et soumises à une charge transversale uniforme dans un environnement thermique, sont présentés et discutés. Les caractéristiques matérielles effectives des plaques renforcées par de nanotube de carbone (CNTRC) utilisées tout au long de ce travail sont indiquées ci-après.

Le polymère organique semi-conjugué poly {(m-phenylene vinylene)-Co-[(2.5-dioctoxy-p-phenylene) vinylene]}, désigné sous le nom de PmPV, est choisi comme matrice. Il a été fréquemment utilisé dans les synthèses des composites polymère-CNT. Il a été démontré que la structure chimique du PmPV (voir la figure V.1) permettre la solubilité en raison de la présence de chaînes latérales disquettes et de la conjugaison le long du squelette du polymère, qui permet d'enrouler le polymère autour des nanotubes [*Shi, 1999*].

Les propriétés de ce matériau sont supposées être [*Shen, 2009*] : $\nu^m = 0.34$, $\alpha^m = 45(1 + 0.0005\Delta T) \times 10^{-6}/K$ et $E^m = (3.51 - 0.0047T)GPa$, dans laquelle $T = T_0 + \Delta T$ et $T_0 = 300K$ (température ambiante). De ce fait, $\alpha^m = 45 \times 10^{-6}/K$ et $E^m = 2.1$ GPa à $T_0 = 300K$.

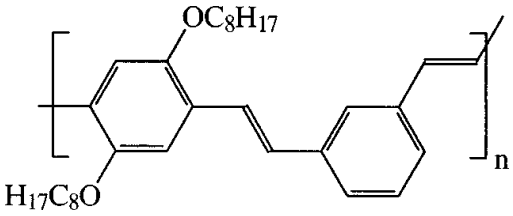


Figure V.1 : structure moléculaire de polymère PmPV.

Les SWCNTs (10, 10) sont choisis en tant que renforts (figure V.2). Il a été démontré ([*Zhang, 2006a*], [*Elliott, 2004*], [*Jin, 2003*], [*Chang, 2005*], [*Zhang, 2006b*]) que les propriétés du matériau SWCNTs sont anisotropes, chiralités et dépendant de la taille et de la température. Par conséquent, toutes les propriétés élastiques effectives d'un SWCNT doiventêtre soigneusement déterminées, sinon les résultats peuvent être incorrects.

À partir de la simulation par la dynamique moléculaire (MD) résulte, les propriétés du matériau dépendant de la taille et de la température pour SWCNT de type armchair (10,10) peuvent être obtenue numériquement [*Shen, 2009*]. Des résultats typiques sont indiqués dans le tableau (V.1). Il est à noter que l'épaisseur de paroi effective obtenue pour un tube (10, 10) est h=0.067 nm [*Vodenitcharova, 2003*], et la valeur de la largeur est 0.34 nm.

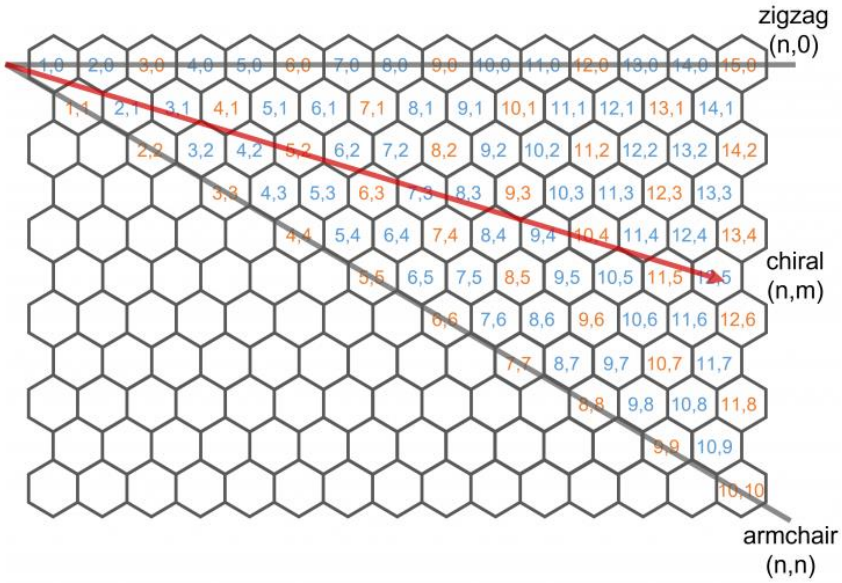


Figure V.2 : SWCNT de type armchair (10,10).

Tableau V.1: Propriétés des matériaux dépendant de la température pour SWCNT (10, 10) (L=9.26 nm; R= 0.68 nm; h= 0.067 nm; $\nu_{12}^{CN} = 0.175$).

Température (K)	E_{11}^{CN} **(TPa)**	E_{22}^{CN} **(TPa)**	G_{12}^{CN} **(TPa)**	$\alpha_{11}^{CN}(\times 10^{-6}/\mathrm{K})$
300	5.6466	7.0800	1.9445	3.4584
500	5.5308	6.9348	1.9643	4.5361
700	5.4744	6.8641	1.9644	4.6677

La question clef pour une bonne application de la loi de mélange à CNTRCs est de déterminer le paramètre d'efficacité du nanotube de carbone (CNT) η_1 . Pour les composites à fibres courtes, η_1 est généralement considéré comme égal à 0,2 [*Fukuda, 1974*]. Cependant, il n'y a pas d'expériences qui ont été menées pour déterminer la valeur de η_1 pour CNTRCs.

Récemment, [*Shen, 2009*] donne une estimation des paramètres d'efficacité $\eta_1$et η_2 en faisant correspondre les modules de Young E_{11} et E_{22} du CNTRCs obtenus par la loi de mélange à ceux obtenus par la méthode de simulation de dynamique moléculaire donnée par [*Han, 2007*]. Par comparaison, nous constatons que les modules de Young obtenus à partir de la loi de mélange et celui de simulation de dynamique moléculaire peuvent correspondre très bien si les paramètres d'efficacité du nanotube de carbone (CNT) $\eta_1$et η_2 sont bien choisi, comme indiqué dans le tableau V.2.

Tableau V.2: Comparaison des modules de Young des composites PmPV/CNT renforcés par des tube (10,10) sous T= 300 K [*Shen, 2009*].

V_{CN}^{*}	MD		Loi de mélange			
	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{11} (GPa)	η_1	E_{22} (GPa)	η_2
0.11	94.8	2.2	94.57	0.149	2.2	0.934
0.14	120.2	2.3	120.09	0.150	2.3	0.941
0.17	145.6	3.5	145.08	0.149	3.5	1.381

Il est clair que différentes valeurs pour le paramètre d'efficacité CNT sont possible en raison de différents cas de fractions volumiques de nanotubes, et ces valeurs seront utilisées dans tous les exemples suivants. Notez qu'il n'y a pas de résultats MD pour le module de cisaillement G_{12}, nous supposons que $\eta_3 = \eta_2$ [*Han, 2007*]. La valeur du module d'Young augmente lorsque les valeurs de la fraction volumique des nanotubes augmentent.

La figure V.3 montre la flèche centrale des plaques FG et UD-CNTRC en fonction de la charge uniforme q et pour une fraction volumique des nanotubes de carbone $V_{CN}^{*} = 0.11$ avec le rapport géométrique a/h = 5 et température $T = 300K$. Les résultats de la théorie actuelle prouvent montrés la bonne corrélation entre eux et ceux obtenus par Bakhti [*Bakhti, 2013*] et pour les deux types de distribution de renforts (FG et UD-CNTRC), ceci permet la validation de nos résultats obtenus ainsi que le modèle utilisé. On peut constater aussi que la flèche centrale de la plaque FG-CNTRC est supérieure à celle de la plaque UD-CNTRC.

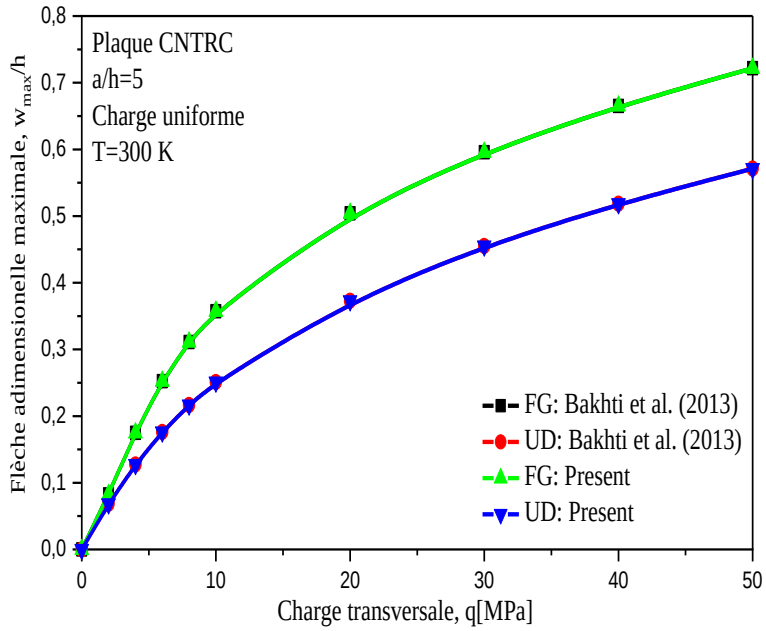


Figure V.3 : Variation de la flèche centrale de la plaque FG et UD-CNTRC en fonction de la charge uniforme q.

La courbe charge-déflexion est présentée sur la figure V.4 pour les plaques FG- et UD-CNTRC avec différentes valeurs de la fraction volumique des nanotubes $V_{CN}^{*} = (0.11, 0.14 \ et \ 0.17)$. Il est intéressant de noter que ces deux types de plaques ont la même fraction massique de nanotubes $W_{CN} = 0.131$, 0.165, et 0.2, respectivement, en prenant la densité de nanotube de carbone $\rho_{CN} = 1.4\ g/cm^3$et la densité de matrice $\rho_m = 1.15\ g/cm^3$dans l'équation (IV.2c) de chapitre précédent. On peut constater que la déflexion centrale de la plaque FG-CNTRC est supérieure à celle de la plaque UD-CNTRC, et la plaque a une déflexion plus élevée lorsqu'elle a une fraction volumique plus faible. On voit que le FG-CNTRC, avec des valeurs de la fraction volumique de nanotubes $V_{CN}^{*} = (0.11)$, a une déflexion maximale en

raison de la rigidité la plus faible et cette déflexion augmente de manière significative avec l'augmentation de la valeur de la charge transversale.

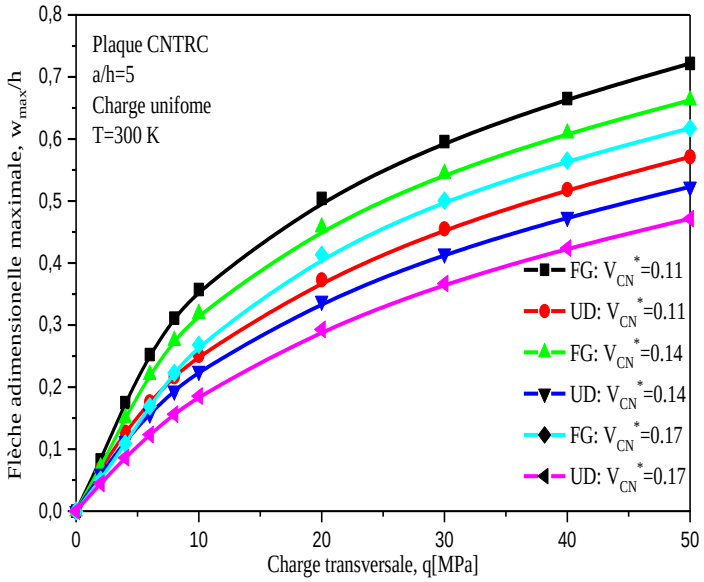


Figure V.4 : Variation de la déflexion centrale adimensionnelle de la plaque CNTRC en fonction de la charge transversale pour différentes fractions volumiques.

La figure V.5 représente la variation de la flèche adimensionnelle maximale en analyse linéaire et non linéaire des plaques FG et UD –CNTRC en fonction de la variation de la charge uniforme appliquée, dont les conditions thermiques sont T = 300 K et la fraction volumique est $V_{CN}^* = 0.11$. A travers ces courbes, on peut remarquer qu'à partir de 0.2h et 0.4h de la flèche maximale pour la plaque UD et FG respectivement, la solution non linéaire est requise. Avec l'augmentation du chargement transversal, on observe une divergence des deux courbes : de l'analyse linéaire et non linéaire. Il est vu aussi que la flèche correspond à l'analyse non linéaire est plus petite que celle de l'analyse linéaire.

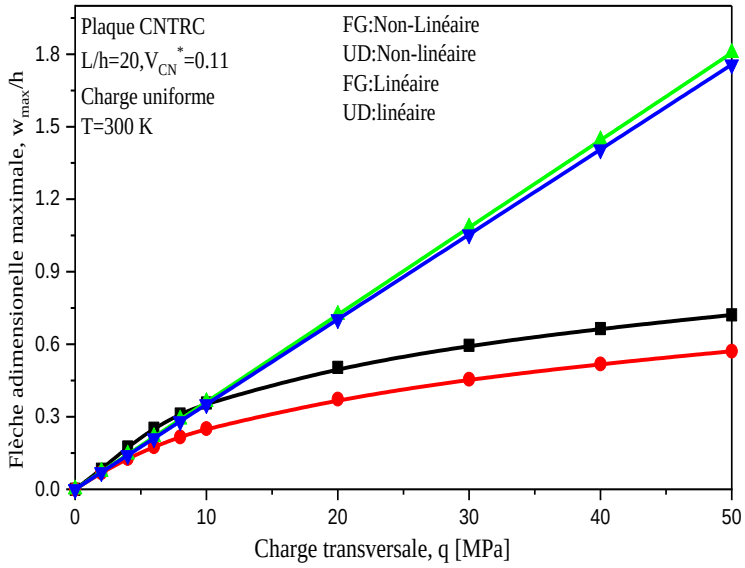


Figure V.5 : Variation de la déflexion centrale adimensionnelle de la plaque CNTRC en fonction de la charge transversale et de différents types d'analyse.

La figue V.6 présente les courbes de variation de la déflexion centrale adimensionnelle en fonction de la charge transversale appliquée pour les plaques FG et UD-CNTRC avec différentes valeurs de rapport de géométrie (a/h=5, 10 et 25), dont les conditions thermiques sont T = 300 K et la fraction volumique est $V_{CN}^{*} = 0.11$, pour montrer l'effet de déformation de cisaillement transversal sur le comportement en flexion non linéaire des plaques. Les résultats montrent que les déviations centrales sont augmentées pour les plaques FG- et UD-CNTRC en augmentant le rapport largeur/épaisseur de la plaque a/h. Donc la diminution de l'épaisseur de la plaque (h) rend la plaque moins épaisse d'où une augmentation dans la valeur de la flèche.

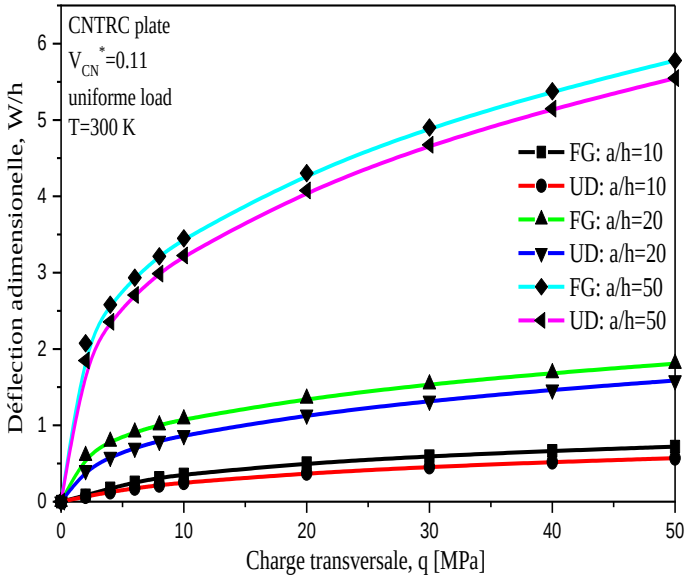
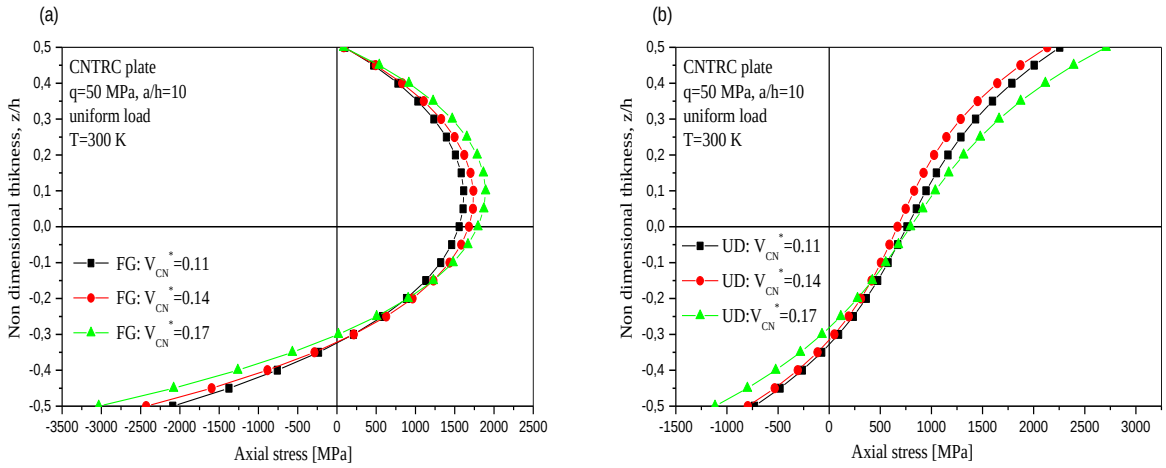


Figure V.6 : Effets du rapport largeur/épaisseur de plaque a/h sur le comportement en flexion non linéaire des plaques CNTRC sous charge transversale q.

Les résultats des contraintes axiales (σ_{xx}) pour différents types de distributions des renforts des plaques (FG et UD-CNTRC) sous une charge uniforme q=50MPa, avec le rapport de géométrie a/h=10 et condition thermique T=300K, sont présentés dans la figures V.7. Cette figure montre les distributions des contraintes axiales de la plaque FG-CNTRC et UD-CNTRC sur l'épaisseur pour différentes valeurs de la fraction volumique de nanotubes ($V_{CN}^{*} = 0.11, 0.14$ and 0.17).

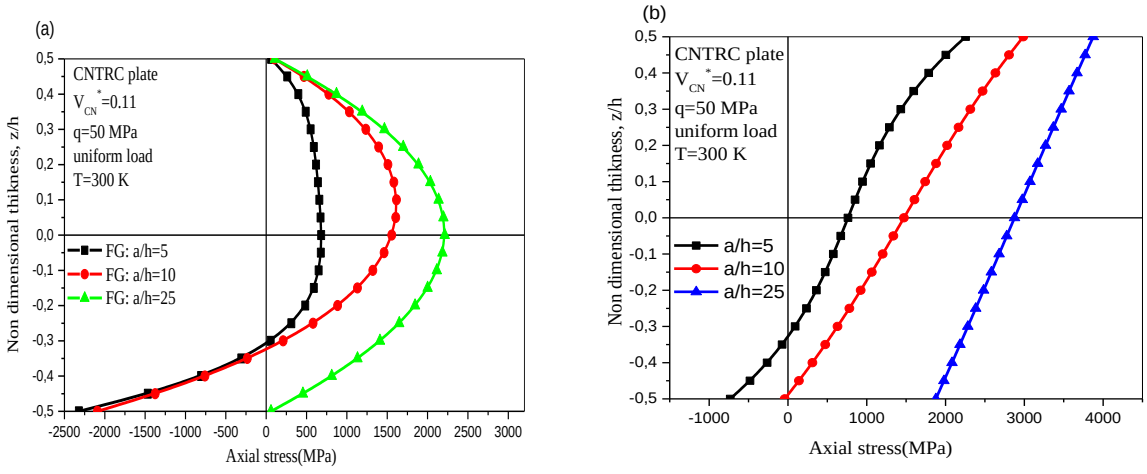
On observe que la contrainte dans les deux cas des plaques se comprime à travers l'épaisseur de la plaque FG pour (z/h <-0.3) et s'avère ensuite être de la traction pour (z/h > -0.3) (figures V.7a et V.7b) en plus ces contraintes augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique. On peut en conclure alors que la fraction volumique V_{CN}^{*} joue un rôle important sur la contrainte axiale σ_{xx} .



(a) FG-CNTRC **(b) UD-CNTRC**

Figure V.7 : Effets de la fraction volumique des nanotubes sur la contrainte axiale à mi-portée de la plaque CNTRC.

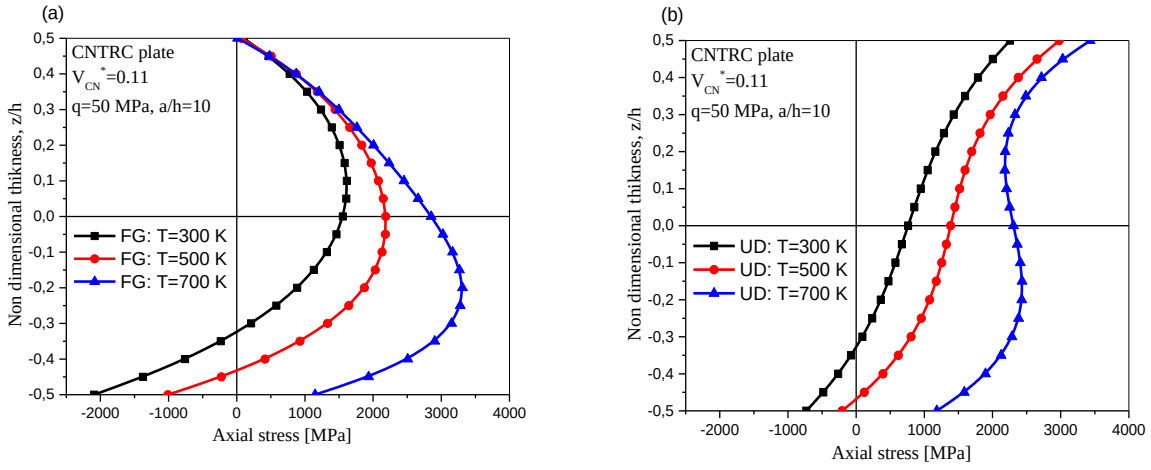
La figure V.8 présente la contrainte axiale pour les plaques FG et UD-CNTRC avec différentes valeurs de rapport largeur sur épaisseur (a/h=5,10 et 25) pour montrer l'effet de déformation de cisaillement transversal sur le comportement de flexion non linéaire de la plaque. On peut voir que la plaque CNTRC épaisse (a/h=5) a la plus faible contrainte axiale. Les résultats montrent aussi que la contrainte axiale est augmentée pour les plaques FG - CNTRC et UD-CNTRC en augmentant le rapport largeur/épaisseur de la plaque (a/h).



(a) FG-CNTRC **(b) UD-CNTRC**

Figure V.8 : Effets du rapport largeur/épaisseur a/h sur la contrainte axiale à mi-portée des plaques CNTRC en analyse non linéaire.

La figure V.9 présente la variation des contraintes axiales à mi-portée pour les plaques FG et UD-CNTRC soumises à une charge uniforme et sous trois ensembles de conditions d'environnement thermiques (T=300 ; 500 et 700 K). Étant donné que les propriétés des matériaux pour la matrice et les SWCNT sont supposées dépendre de la température, la variation de température réduit les modules élastiques et dégrade la résistance des nano composites. On constate que les contraintes axiales augmentent avec l'augmentation de la température. Les contraintes sont en compression sur la surface inférieure et en traction sur la surface supérieure pour T=300K et 500K. Cependant pour T=700K, les contraintes sont en traction sur la surface inférieure et supérieure car la température réduit les modules élastiques et la plaque devient alors entièrement tendue quelque soit la distribution des renforts.



(a) FG-CNTRC **(b) UD-CNTRC**

Figure V.9 : Effets des changements de température sur la contrainte axiale à mi-portée des plaques CNTRC.

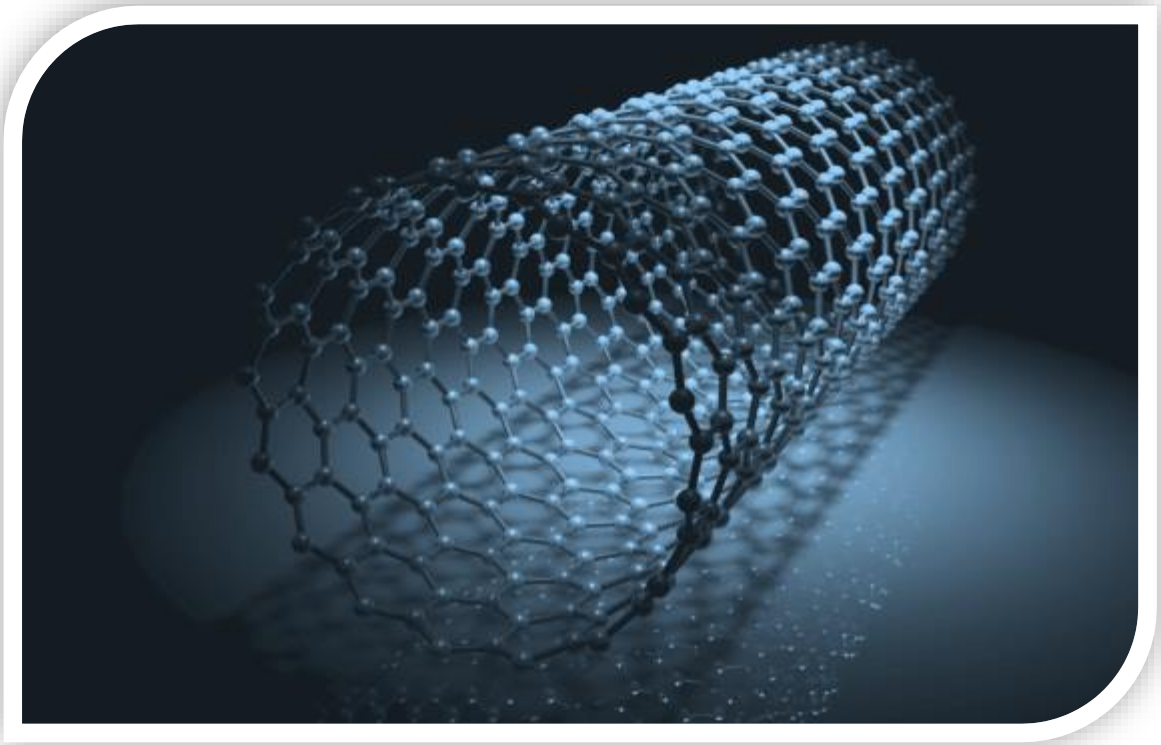
V.3.Conclusion

Dans ce travail, une théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé (HSDT) en utilisant une simple intégrale pour l'analyse du comportement non linéaire de flexion cylindrique de plaques composites renforcées par des nanotubes de carbone (CNTRC) dans un environnement thermique, est présentée. Cette théorie utilisée prend en considération l'effet de cisaillement transversal sans inclure le facteur de correction.

Les propriétés matérielles des plaques composites(CNTRCs) sont supposées dépendre de la température et prédis en utilisant la loi de mélange. Les relations déformation-déplacement de Von Karman sont utilisées pour étudier la non-linéarité géométrique.

La précision et l'efficacité des modèles utilisés sont vérifiées en les comparants avec d'autres théories disponibles dans la littérature et un bon accord a été observé dans tous les exemples Nous pouvons enfin conclure que le choix de méthode d'étude et les propriétés matérielles ont un effet significatif sur la flèche, les contraintes et la fréquence des plaques (FG-CNTRCs) simplement appuyées.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES



Conclusion et Perspectives

L'utilisation des matériaux composites à base de nanotube de carbone (CNT) et à matrice polymère, apparaît comme une voie prometteuse dans le domaine des nouveaux matériaux composites grâce à leurs propriétés mécaniques et thermiques très particulières.

A travers cette étude, le comportement de flexion cylindrique non linéaire de plaques composites renforcées de nanotubes de carbone fonctionnellement graduées (FG-CNTRC) et soumises à une charge uniforme transversale dans des environnements thermiques a été analysé, en utilisant une théorie d'ordre supérieur (HSDT) des plaques par intégrale simple et une théorie des grandes déformations non linéaires du type Von Karman. Les propriétés matérielles du FG-CNTRC sont supposées être graduées dans l'épaisseur et estimées par la loi de mélange. Le concept d'énergie ainsi que la présente théorie et la méthode de Ritz sont utilisés pour prédire la grande déflexion et la contrainte à travers l'épaisseur des plaques FG-CNTRC. La précision et l'efficacité de la présente théorie ont été démontrées pour l'analyse de flexion cylindrique non linéaire de plaques FG-CNTRC simplement appuyées.

Dans le cadre de ce travail, on a étudié les effets dela fraction volumique des nanotubes de carbones (Vcnt), de la distribution de CNT, du rapport longueur/épaisseur (a/h) et des variations de température. Ces différents paramètres pouvant influencer sur l'analyse de flexion non linéaire d'une plaque renforcée par des nanotubes de carbone à paroi unique (SWCNT) fonctionnellement graduée dans un environnement thermique à l'aide d'une théorie de déformation de cisaillement d'ordre supérieur (HSDT) par intégrale simple, sont analysés et discutés en détail. La précision et la performance de la présente théorie ont été vérifiées et comparées à d'autres résultats des théories disponibles dans la littérature.

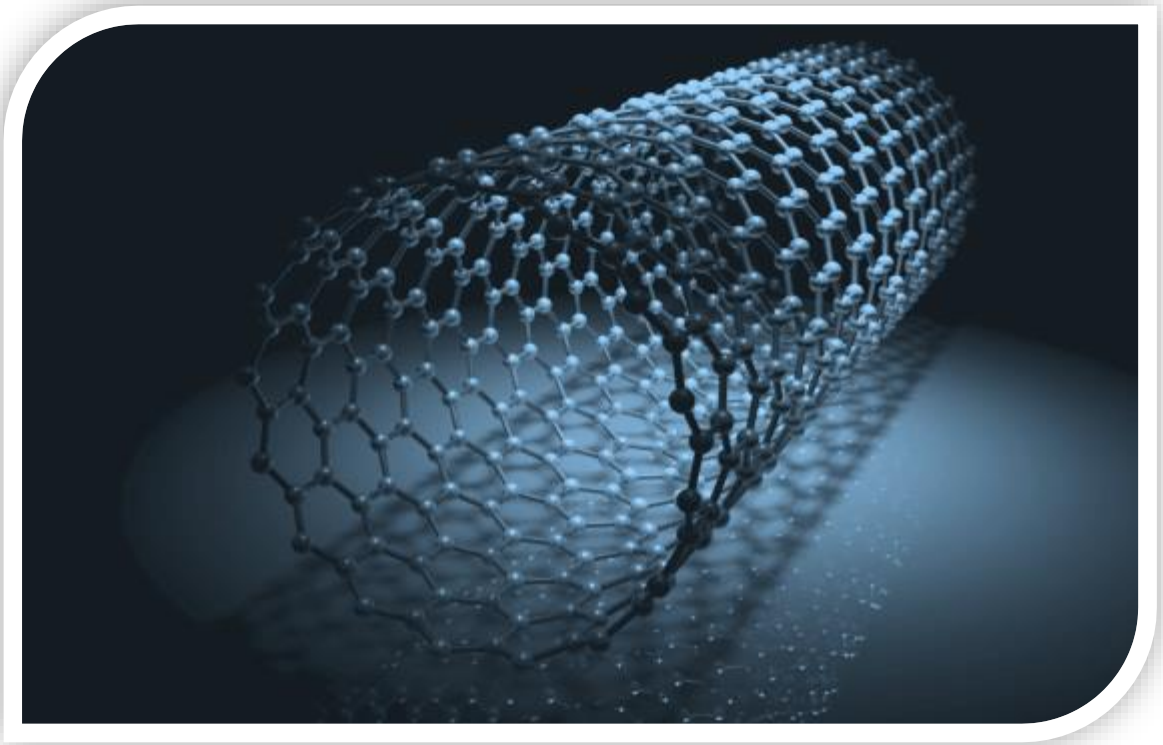
Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La disposition des nanotubes de carbone dans la matrice polymère influe sur les flèches ;
- La déviation centrale de la plaque FG-CNTRC est supérieure à celle de la plaque UD-CNTRC ;
- Les plaques renforcées par des nanotubes uniformément distribuées UD-CNTRC sont plus rigides que celles renforcées par des nanotubes distribués graduellement FG-CNTRC ;

- Les plaques contenant des fractions volumiques des nanotubes de carbone plus élevées ont des flèches faibles ;
- L'augmentation de l'amplitude de la charge fait que la flèche dans l'analyse non linéaire est inférieure à celle de l'analyse linéaire ;
- Les déviations centrales sont augmentées pour les plaques FG- CNTRC et UD-CNTRC en augmentant le rapport géométrique longueur/épaisseur de la plaque ;
- Les contraintes axiales sont augmentées pour les plaques FG- CNTRC et UD-CNTRC en augmentant le rapport longueur/épaisseur (a/h);
- La température influe sur la flèche de la plaque d'où elle influe sur la résistance de cette dernière ;
- Les contraintes axiales sont augmentées avec l'augmentation de la température.

Enfin, il faut souligner l'intérêt des nanotubes de carbone dans la matrice polymère qui suscitent beaucoup d'attention scientifique, en raison de leurs propriétés mécaniques et thermiques remarquables. Cette étude peut servir alors comme une base de données pour les futures recherches dans le but de développer et d'approfondir les connaissances dans les domaines d'utilisation des nano composites à base de polymère et de nanotube de carbone (CNTRC/Polymère) en mettant en évidence leurs bénéfices structurels, fonctionnels et économiques espérés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



Références Bibliographiques

A

[**Abdelaziz 2017]** Abdelaziz, H.H., Ait Amar Meziane, M., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. and Alwabli, A.S. (2017), « An efficient hyperbolic shear deformation theory for bending, buckling and free vibration of FGM sandwich plates with various boundary conditions », Steel Compos. Struct., 25(6), 693-704.

[Abdelli 2008] Abdelli, F. (2008), « Elaboration Et Caracterisation De Nanocomposites Cellulose / Montmorillonite », Memoire De Magister universite M'hamed Bougara.

[Abualnour 2018] Abualnour, M., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Adda Bedia, E.A. and Mahmoud, S.R. (2018), « A novel quasi-3D trigonometric plate theory for free vibration analysis of advanced composite plates » , Compos. Struct., 184, 688-697.

[Addiego 2006] Addiego, F. (2006), « Caractérisation de la variation volumique du polyéthylène au cours de la déformation plastique en traction et en fluage », Thèse de doctorat, Université de Lorraine.

[Addou 2019] Addou, F.Y., Meradjah, M., Bousahla, A.A., et al. (2019), «Influences of porosity on dynamic response of FG plates resting on Winkler/pasternak/kerr foundation using quasi 3D HSDT». Comput Concrete.,24(4), 347–367.

[Adhikari 2020] Adhikari, B., Dash, P., Singh, B. (2020), « Buckling analysis of porous FGM sandwich plates under various types nonuniform edge compression based on higher order shear deformation theory ». Compos. Struct. 251, 112597.

[Ait Atmane 2010] Ait Atmane. H, Tounsi. A., Mechab. I., Adda Bedia. E.A. (2010), « Free vibration analysis of functionally graded plates resting on Winkler-Pasternak elastic foundations using a new shear deformation theory ». Int. J. Mech. Mater. Design., 6 (2), 113-121.

[Ajayan 1993] Ajayan, P. M., lijita, S. (1993), « Capillarity-induced filling of carbon nanotubes », Nature 333-361.

[Ajayan 1994] Ajayan, P. M., Stephan, O., Colliex, C., Trauth, D. (1994), « Aligned carbon nanotube arrays - Formed by cutting a polymer resin-nanotube composite », Science, 265 (5176), 1212- 1214.

[Akavci 2015] Akavci, S. S. et Tanrikulu, A. H. (2015), « Static and free vibration analysis of functionally graded plates based on a new quasi-3D and 2D shear deformation theories », Composites Part B: Engineering, 83.

[Al-Dahawi 2016a] Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Emami, F., Yıldırım, G., and Şahmaran, M. (2016a). « Effect of Mixing Methods on the Electrical Properties of Cementitious Composites Incorporating Different Carbon-Based Materials ». Construction Building Mater., 104, 160–168.

[Al-Dahawi 2016b] Al-Dahawi, A., Sarwary, M. H., Öztürk, O., Yıldırım, G., Akın, G., Şahmaran, M.et al. (2016b). « Electrical Percolation Threshold of Cementitious Composites Possessing Self-Sensing Functionality Incorporating Different Carbon-Based Materials ». Smart Mater. Struct., 25, 105005.

[Al-Dahawi 2017] Al-Dahawi, A., Yıldırım, G., Öztürk, O., and Şahmaran, M. (2017). « Assessment of Self-Sensing Capability of Engineered Cementitious Composites within the Elastic and Plastic Ranges of Cyclic Flexural Loading ». Construction Building Mater., 145, 1–10.

[Allaoui 2005] Allaoui, A. (2005). « Comportement mécanique et électrique des enchevêtrements de nanotubes de carbone », Thèse Ecole Centrale Paris.

[Amabili 2020] Amabili, M., & Balasubramanian, P. (2020). « Nonlinear forced vibrations of

laminated composite conical shells by using a refined shear deformation theory ». Composite Structures., 112522.

[Ambartsumian 1969] Ambartsumian, S.A. (1969). « Principal equations and correlations in different modulus theory of elasticity of anisotropic bodies ». Izvestija ANSSSR, MTT, 3.

[Arani 2011] Arani, A.G., Mohammadimehr, M., Saidi, A.R., Shogaei, S. and Arefmanesh, A. (2011). « Thermal buckling analysis of double-walled carbon nanotubes considering the small-scale length effect », Mechanical Engineering Science., 225, 248-256.

[Arlie 1980] Arlie, P J. (1980). « Caoutchoucs synthétiques, Procédés et données économiques », ÉditionsTechnip.

[Aubry 2009] Aubry, C. (2009). « Développement et mise en oeuvre de structures textiles multifonctionnelles contenant des nanotubes de carbone – Application aux capteurs chimiques pour la détection de solvants », L'Université des sciences et technologiques de Lille.

[Aydogdu 2009] Aydogdu, M. (2009). « A new shear deformation theory for laminated composite plates », Composite Structures, 94- 101.

B

[Bachtold 2001] Bachtold, A. (2001). « Logic Circuits with Carbon Nanotube Transistors », Science., 294(5545), 1317–1320.

[Bakhadda 2021] bakhadda, B. (2021). « Etude Du Comportement Mécanique Des Structures En Nano-Composites », thèse de doctorat, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie.

[Bakhti 2014] Bakhti, K. (2014). « Etude de l'effet de la température sur la flexion des plaques composites sous des larges déformations », thèse de doctorat, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie.

[Bartholome 2008] Bartholome, C., Miaudet, P., Derré, A., Maugey, M., Roubeau, O., Zakri, C., & Poulin, P., (2008). « Influence of surface functionalization on the thermal and electrical properties of nanotube-PVA composites », Composites science and technology., 68 (12), 2568-2573.

[Baziz 2010] Baziz, M. (2010). « Syntheses Et Caracterisations De Nanocomposites Polyaniline – Sepiolite », Mémoire de Magister, L'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohammed Boudiaf.

[Belarbi 2021] Belarbi, M.O., Garg, A., Houari, M.S.A., Hirane, H., Tounsi, A., & Chalak, H. D. (2021). « A three-unknown refined shear beam element model for buckling analysis of functionally graded curved sandwich beams ». Engineering with Computers., 38(5), 4273–4300.

[Belkhodja 2020] Belkhodja, Y., Ouinas, D., Zaoui, F. Z., & Fekirini, H. (2020). « An exponential-trigonometric higher order shear deformation theory (HSDT) for bending, free vibration, and buckling analysis of functionally graded materials (FGMs) plates », Advanced Composites Letters, 29.

[Bellifa 2016] Bellifa, H., Benrahou, K. H., Hadji, L., Houari, M. S. A., & Tounsi, A. (2016). « Bending and free vibration analysis of functionally graded plates using a simple shear deformation theory and the concept the neutral surface position », Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 38(1), 265-275.

[Bellifa 2017] Bellifa, H., Bakora, A., Tounsi, A., Bousahla, A. A., & Mahmoud, S. R. (2017). « An efficient and simple four variable refined plate theory for buckling analysis of functionally graded plates », Steel and Composite Structures, 25(3), 257-270.

[Benachour 2011] Benachour, A., Hassaine Daouadji, T., Ait Atmane, H., Tounsi,A., Meftah, S. A. (2011). « A four variable refined plate theory for free vibrations of functionally graded plates with arbitrary gradient ». Composites: Part B 42, 1386–1394.

[Benahmed 2017] Benahmed, A., Houari, M. S. A., Benyoucef, S., Belakhdar, K., & Tounsi, A (2017). « A novel quasi-3D hyperbolic shear deformation theory for functionally graded thick rectangular plates on elastic foundation », Geomechanics and Engineering, 12(1), 9-34.

[Bennoun 2014] Bennoun. M., Houari, M.S.A., Tounsi, A. (2014). « A novel five variable refined plate theory for vibration analysis of functionally graded sandwich plates ». Mech Adv Mater Struct.

[Bennoun 2016] Bennoun, M., Houari, M. S. A. et Tounsi, A. (2016). « A novel five-variable refined plate theory for vibration analysis of functionally graded sandwich plates », Mechanics of Advanced Materials and Structures, 23(4), 423-431.

[Benzair 2008] Benzair, A. Tounsi, A. Besseghier, A. Heireche, H. Moulay, N. Boumia, L. (2008). « The thermal effect on vibration of single-walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory », J. Phys. D: Appl. Phys., 41(22), 225404.

[Berber 2000] Berber, S., Kwon, Y. K., & Tománek, D. (2000). « Electronic and structural properties of carbon nanohorns », Physical Review B, 62(4), R2291.

[Berber 2000] Berber, S., Kwon, Y. K., & Tománek, D. (2000). « Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes », Phys. Rev. Lett., 84, 4613-4616.

[Bergaya 2006] Bergaya, F., & Lagaly, G. (2006). « General introduction: clays, clay minerals, and clay science», Developments in clay science, 1, 1-18.

[Bergaya 2013] Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). « Handbook of clay science», Newnes.

[Bernard 2007] Bernard, C. « Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nanosondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules », thèse de doctorat, l'Université Bordeaux I, (2007).

[Bessaim 2013] Bessaim, A., Houari, M. S., Tounsi, A., Mahmoud, S. R., & Bedia, E. A. A. (2013). « A new higher-order shear and normal deformation theory for the static and free vibration analysis of sandwich plates with functionally graded isotropic face sheets », Journal of Sandwich Structures and Materials, 15(6), 671-703.

[Bethune 1993] Bethune, D. S., Kiang, C. H., De Vries, M. S., Gorman, G., Savoy, R., Vazquez, J., & Beyers, R. (1993). « Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls», Nature, 363(6430), 605-607.

[Bhaskar 2014] Bhaskar, K., Varadan, T. (2014). «Plates: theories and applications», John Wiley & Sons.

[Biercuk 2002] Biercuk, M. J., Llaguno, M. C., Radosavljevic, M., Hyun, J. K., Johnson, A. T., & Fischer, J. E. (2002), « Carbon nanotube composites for thermal management », Appl. Phys. Lett., 80, 2767-2769.

[Bonard 1997] Bonard, J.M., Stora, T., Salvetat, J.P., Maier, C. T., Stöckli, C. Duschl, L. Corro, W.A., Heer, C., (1997). Avanced Materials, 9(827).

[Bouazza 2018] Bouazza, M., Benseddiq, N., & Zenkour, A. M. (2018). « Thermal buckling analysis of laminated composite beams using hyperbolic refined shear deformation theory ». Journal of Thermal Stresses, 42(3), 332-340.

[Bouazza 2020] Bouazza, M., & Zenkour, A. M. (2020). « Hygro-thermo-mechanical buckling of laminated beam using hyperbolic refined shear deformation theory ». Composite Structures, 252, 112689.

[Bouhadra 2018] Bouhadra, A., Tounsi, A., Bousahla, A. A., Benyoucef, S., & Mahmoud, S. R. (2018). « Improved HSDT accounting for effect of thickness stretching in advanced composite plates », Structural Engineering and Mechanics, 66(1), 61-73.

[Boulal 2020] Boulal, A., Bensattalah, T., Karas, A., Zidour, M., Heireche, H., & Bedia, E. A. (2020), « Buckling of carbon nanotube reinforced composite plates supported by Kerr foundation

using Hamilton's energy principle», Structural Engineering and Mechanics, 73(2), 209-223.

[Bourihane 2020] Bourihane, O., Hilali, Y., Mhada, K. (2020). « Nonlinear dynamic response of functionally graded material plates using a high-order implicit algorithm ». ZAMM-J. Appl. Math. Mech./Zeitschrift für Angewandte Math. Mech. 100(12), e202000087

[Boussaboun 2016] Boussaboun, Z. (2016). « Synthèse et caractérisation de nanocomposites d'argile et de graphène formés à partir de précurseurs organiques », Mémoire Présenté A L'école De Technologie Supérieure, Université Du Québec.

[Bozlar 2009] Bozlar, M. (2009) « Modification de surface des nanotubes de carbone par un polymère conducteur électrogénéré pour la réalisation de nanocomposites multifonctionnels », thèse de doctorat, « École Centrale Paris» école normal supérieure de cachan.

[Breuer 2004] Breuer, O., & Sundararaj, U. (2004). « Big returns from small fibers: a review of polymer/carbon nanotube composites», Polymer composites, 25(6), 630-645.

[Brigatti 2006] Brigatti, M. F., Galan, E., & Theng, B. K. G. (2006). « Structures and mineralogy of clay minerals ». Developments in clay science, 1, 19-86.

[Brying 2005] Bryning, M. B., Islam, M. F., Kikkawa, J. M., &Yodh, A. G. (2005), « Very low conductivity threshold in bulk isotropic single-walled carbon nanotube-epoxy composites », Adv.Mater., 17, 1186-1191.

[Buchoux 2011] Buchoux, J. (2011). « Nanotubes de carbone comme sondes en microscopie à force atomique », thèse de doctorat, l'Université Bordeaux I.

C

[Cadek 1982] Cadek. M., Coleman, J. N., Barron, V., Hedicke, K., & Blau, W. J. (2002). « Morphological andmechanical properties of carbon-nanotube-reinforced semi crystalline and amorphous polymer composites ». Appl. Phys. Lett., 81, 5123-5125.

[Camargo 2009] Camargo, P.H.C., Satyanarayana, K.G., Wypych, F. (2009). « Nanocomposites: Synthèse, Structure, propriétés et de nouvelles possibilités d'application, en recherche sur les matériaux », 12, 1-39.

[Cantor 2004] Cantor, B., Dunne, F. P., & Stone, I. C. (Eds.). (2003). « Metal and ceramic matrix composites», CRC Press.

[Cauvin 2009] L. Cauvin, (2009). « Etude expérimentale et modélisation micromécanique du comportement de nanocomposites à renforts plaquettaires », Thèse de doctorat, Université de Lille 1.

[Chabert 2002] Chabert, E. (2002). « propriétés mécaniques de nanocomposites à matrice polymère : approche expérimentale et modélisation ». Thèse de doctorat, département génie des matériaux de l'INSA, Lyon, France.

[Charlier 2003] Charlier, J. C. (2003). « Propriétés électroniques des nanotubes de carbone », Cours Ecole Nanotube Aussois.

[Chemi 2018] 40] Chemi, A., Heireche, H., Zidour, M., Rakrak, K., Bousahla, A. A. (2015). « Critical buckling load of chiral double-walled carbon nanotube using non-local theory elasticity », Advances in Nano Research 3, 4, 193-206.

[Choi 2001] Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E., & Grulke, E. A. (2001). « Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube ». Applied physics letters, 79(14), 2252-2254.

[Choudhary 2013] Choudhary, V., Singh, B. P., & Mathur, R. B. (2013). « Carbon nanotubes and their composites ». Syntheses and applications of carbon nanotubes and their composites, 9, 193-222.

[Chun 2008] Chun, J., Fagan, J. A., Hobbie, E. K., & Bauer, B. J. (2008). « Size separation of

single-wall carbon nanotubes by flow-field flow fractionation». Analytical chemistry, 80(7), 2514-2523.

[Collins 2001] Collins, P. G., Arnold, M. S., & Avouris, P. (2001). « Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown », science, 292(5517), 706-709.

[Cukanovic 2018] Čukanović, D., Radaković, A., Bogdanović, G., Milanović, M., Redžović, H., & Dragović, D. (2018). « New Shape Function for the Bending Analysis of Functionally Graded Plate », Materials, 11(12), 2381.

D

[Dai 1996] Dai, H., Hafner, J. H., Rinzler, A. G., Colbert, D. T., & Smalley, R. E. (1996). «Nanotubes as nanoprobes in scanning probe microscopy», Nature, 384(6605), 147–150.

[DAVID 2009] Lide, D. R. (Ed.). (2004). « CRC handbook of chemistry and physics», 85. CRC press.

[Davoudi 2013] Davoudi, K. (2013). « Mechanical properties of polymers ». Repéré à https://scholar.harvard.edu/files/kamyar/files/2013-10-17_deformation_of_polymers.pdf

[Dihaj 2018] Dihaj, A. (2018). « Modélisation numérique du comportement mécanique d'un nanocomposite a matrice polymère et nano-renfort », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès,

[Dresselhaus 2001] Dresselhaus, M. S., & Avouris, P. (2001). «Introduction to carbon materials research. In Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties, and applications», 1-9. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

[Ducastelle 2003] Ducastelle, F. (Mai 2003). « Propriétés electroniques », Cours Ecole Nanotube Aussois.

[Duesberg 1998] Duesberg, G. S., Muster, J., Krstic, V., Burghard, M., & Roth, S. (1998). « Chromatographic size separation of single-wall carbon nanotubes», Applied Physics A: Materials Science & Processing, 67(1).

[Duesberg 1999] Duesberg, G. S., Blau, W., Byrne, H. J., Muster, J., Burghard, M., & Roth, S. (1999). « Chromatography of carbon nanotubes », Synthetic Metals, 103(1-3), 2484-2485.

[Dupeux 2004] Dupeux, M., Aide-mémoire - Science des matériaux, Editions Dunod, Paris, 2004. Recycled Plastics. (2014). Thermoplastics vs Thermosetting plastics. Repéré à http://www.recycledplastic.com/index.html%3Fp=10288.html

E

[Ebbesen 1992] Ebbesen, T. W., & Ajayan, P. M. (1992). « Large-scale synthesis of carbon nanotubes », Nature, 358(6383), 220-222.

[Ebbesen 1996] Ebbesen, T. W., Lezec, H. J., Hiura, H., Bennett, J. W., Ghaemi, H. F., & Thio, T. (1996). « Electrical conductivity of individual carbon nanotubes», Nature, 382(6586), 54-56.

[Thio 1996] Thio, T. (1996). « Electricalconductivity of individualcarbon nanotubes ». Nature, 382, 54-56.

[El Meiche 2011] El Meiche, N., Tounsi, A., Ziane, N., Mechab, I. et Adda Bedia,E.A. (2011), « A new hyperbolic shear deformation theory for buckling and vibration of functionally graded sandwich plate », International Journal of Mechanical Sciences, 237– 247.

[Endo 1995] Endo, M., Takeuchi, K., Kobori, K., Takahashi, K., Kroto, H. W., & Sarkar, A. (1995). « Pyrolytic carbon nanotubes from vapor-grown carbon fibers», Carbon, 33(7), 873-881.

[Enouz 2003] Enouz, S. (2003). « étude de nanotubes de carbone dopés à l'azote par Microscopie Electronique en Transmission Haute Résolution et Spectroscopie de Pertes d'Energie », Stage de

DEA Matière et Rayonnement, Université de Rennes1.

[Environnement Canada 2011] Environnement Canada, (2011). « Ébauche d'évaluation préalable pour le défi concernant le noir de carbone », Numéro de registre du Chemical Abstracts Service, 1333-86-4.

[Esawi 2007] Esawi, A. M. K., & Farag, M. M. (2007), «Carbon nanotube reinforced composites: Potential and current challenges», Materials & Design.,**28**(9), 2394–2401.

F

[Fina 2006] Fina, A., Abbenhuis, H. C. L., Tabuani, D., Frache, A., & Camino, G. (2006). « Polypropylene metal functionalised POSS nanocomposites: a study by thermogravimetric analysis», Polymer Degradation and Stability, 91(5), 1064-1070.

[Fontanille 2010] Fontanille, M., Gnanou, Y. (2010). « Chimie et physico-chimie des polymères », 2ème edition, Dunod, Paris.

[Fukuda 1974] Fukuda, H., & Kawata, K. (1974). « On Young's modulus of short fibre composites», Fibre science and technology, 7(3), 207-222.

G

[Garaj 2010] Garaj, S., Hubbard, W., & Golovchenko, J. A. (2010). « Graphene synthesis by ion implantation », Applied physics letters, 97(18).

[Garrido 2012] Garrido, E. (2012). « Fonctionnalisation de nanotubes de carbone pour leur incorporation dans des matrices métalliques », spécialité : Physico-Chimie de la Matière Condensée.

[Ghassabi 2020] Ghassabi, M., Zarastvand, M. R., & Talebitooti, R. (2020). «Investigation of state vector computational solution on modeling of wave propagation through functionally graded nanocomposite doubly curved thick structures», Engineering with Computers, 36(4), 1417-1433.

[Gloaguen 2007] Gloaguen, J. and Lefebvre, J. (2007). « nanocomposites polymères /silicates en feuillets ». Techniques de lingénieur.

[Gohier 2007] Gohier, A. (2007). « Cinétique de Croissance de Nanotube de Carbone Mono-Parois et Multi-Parois Orientes par Procède Plasma », Thèse de Doctorat, l'Université de Nantes (Sciences des Matériaux).

[Gohier 2007] Gohier, A. (2007). « Cinétique de Croissance de Nanotube de Carbone Mono-Parois et Multi-Parois Orientes par Procède Plasma », Thèse de Doctorat, l'Université de Nantes (Sciences des Matériaux).

[Gonnet 2006] Gonnet, P., Liang, Z., Choi, E. S., Kadambala, R. S., Zhang, C., Brooks, J. S., ... & Kramer, L. (2006). « Thermal conductivity of magnetically aligned carbon nanotube buckypapers and nanocomposites », Current Applied Physics, 6(1), 119-122.

[González 2012] González Tovar, I., Boufi, S., Pèlach Serra, M. À., Alcalà Vilavella, M., Vilaseca Morera, F., & Mutjé Pujol, P. (2012). «Nanofibrillated cellulose as paper additive in eucalyptus pulps», © BioResources, 7(4), 5167-5180.

[Grobert 1999] Grobert, N., Hsu, W. K., Zhu, Y. Q., Hare, J. P., Kroto, H. W., Walton, D. R. M., ... & Morales, F. (1999). « Enhanced magnetic coercivities in Fe nanowires », Applied Physics Letters, 75(21), 3363-3365.

[Grover 2013] Grover, N., Maiti, D. K., & Singh, B. N. (2013). « A new inverse hyperbolic shear deformation theory for static and buckling analysis of laminated composite and sandwich plates », Composite Structures, 95, 667-675.

[Guerrero 2008] Guerrero, A., Puerta, J., Gomez, F., & Blanco, F. (2008). «Synthesis of carbon nanotubes by laser ablation in graphite substrate of industrial arc electrodes», Physica Scripta, 2008(T131), 014007.

[Gul 2016] Gul, S., Kausar, A., Bakhtiar, M., and Jabeen, S. (2016). « Research Progress on Properties and Applications of Polymer/Clay Nanocomposite », Polymer- Plastics Technology and Engineering, 55(7), 684-703.

[Guo 1995] Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A., Colbert, D., and Smalley, R. (1995). «Catalytic growth of single-walled manotubes by laser vaporization», Chem. Phys. Lett. 243, 49–54.

[Gupta 2017] Gupta, S., Gonzalez, J. G., and Loh, K. J. (2017). « Self-sensing concrete Enabled by Nano-Engineered Cement-Aggregate Interfaces ». Struct. Health Monit. 16, 309–323.

H

[Hadji 2011] Hadji, L., Atmane, H.A., Tounsi, A., Mechab, I. and Adda Bedia, E.A., (2011). « Free vibration of functionally graded sandwich plates using four-variable refined plate theory », Applied Mathematics and Mechanics, 925–94.

[Hajmohammad 2018] Hajmohammad, M. H., Zarei, M. S., Farrokhian, A., & Kolahchi, R. (2018). « A layerwise theory for buckling analysis of truncated conical shells reinforced by CNTs and carbon fibers integrated with piezoelectric layers in hygrothermal environment», Advances in Nano Research., 6(4), 299–321.

[Halary 2006] Halary, J. L. & Lauprêtre, F. (2006). « De la macromolécule au matériau polymère - Synthèse et propriétés des chaînes », Editions Belin.

[Hamidi 2018] Hamidi, A., Zidour, M., Bouakkaz, K. and Bensattalah, T. (2018), « Thermal and small-scale effects on vibration of embedded armchair single-walled carbon nanotubes », J. Nano Res., 51, 24- 38.

[Han 2011] Han, Z., & Fina, A. (2011). « Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites », A review. Progress in polymer science, 36(7), 914-944.

[Hassar 2013] Hassar, M., (2013). « Influence des nano-charges de noir de carbone sur le comportement mécanique de matériaux composites : Application au blindage électromagnétique », Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne.

[Haudin 1995] Haudin, J.M., (1995). « Structure et morphologie des polymères semi-cristallins ». In : G'SELL, C, Introduction à la mécanique des polymères. Institut National polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 97-115.

[Hebali 2014] Hebali, H., Tounsi, A., Houari, M.S.A., Bessaim, A., Adda Bedia, E.A. (2014), « New quasi-3D hyperbolic shear deformation theory for the static and free vibration analysis of functionally graded plates », Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 140, 374 – 383.

[Heireche 2008] Heireche, H. Tounsi, A Benzair,. A. Maachou, M. Adda Bedia, E.A. (2008). « Sound wave propagation in single-walled carbon nanotubes using nonlocal elasticity », Physica E 40 2791–2799

[Hong 2008] Hong, W. T., & Tai, N. H. (2008). « Investigations on the thermal conductivity of composites reinforced with carbon nanotubes », Diamond and Related Materials, 17(7-10), 1577-1581.

[Hu 2005] Hu, H., Yu, A., Kim, E., Zhao, B., Itkis, M. E., Bekyarova, E., & Haddon, R. C. (2005). « Influence of the Zeta Potential on the Dispersability and Purification of Single-Walled Carbon Nanotubes », The Journal of Physical Chemistry B, 109(23), 11520-11524.

[Huxtable 2003] Huxtable, S. T., Cahill, D. G., Shenogin, S., Xue, L., Ozisik, R., Barone, P., ... & Keblinski, P. (2003). « Interfacial heat flow in carbon nanotube suspensions », Nature materials,

2(11), 731-734.

I

[Iijima 1991] Iijima, S. « Helical microtubules of graphitic carbon », Nature, 354, 56-58, 1991.

[Iijima 1993] Iijima, S. Ichihashi, T. (1993). « Single-shell carbon nanotubes of 1 nm diameter », Nature, 363, 603.

[Izard 2004] Izard, N. (2004). « Nanotubes de carbone : Systèmes pour la limitation optique », thèse de doctorat, l'Université Montpellier II.

J

[Jalal 2018] Jalal, M., Moradi-Dastjerdi, R., &Bidram, M. (2018), « Big data in nanocomposites: ONN approach and mesh-free method for functionally graded carbon nanotube-reinforced composites», Journal of Computational Design and Engineering., **6**(2), 209-223.

[Jin 2003] Jin, Y. and Yuan, F. G. (2003). « Simulation of elastic properties of single-walled carbon nanotubes ». Composites Science and Technology, 63(11), 1507-1515.

[Jung 2001] Jung, M., Eun, K.Y., Lee, J.-K. Baik, Y.-J., Lee, K.-R., Park, J. W. (2001). « Growth of carbon nanotubes by chemical vapor deposition », Diamond and related Materials, 10 1235.

K

[Kaci 2012] Kaci, A., Tounsi, A., Bakhti, K., Adda Bedia, E.A. (2012), «Nonlinear cylindrical bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates», Steel and Composite Structures, 12(6), 491- 504.

[Kaczkowski 1968] Kaczkowski Z. (1968), « Plates-statistical calculations ». Warsaw: Arkady.

[Kaddari 2020] Kaddari, M., Kaci, A., Bousahla, A. A., Tounsi, A., Bourada, F., Bedia, E. A., & Al-Osta, M. A. (2020). « A study on the structural behaviour of functionally graded porous plates on elastic foundation using a new quasi-3D model: Bending and free vibration analysis », Computers and Concrete, 25(1).

[Kassimi 2010/2011] N. Kassimi, « Etude des contraintes d'interface d'une poutre FGM renforcées par une plaque ».

[Kau 2001] Kausch, H.-H., Heymans, N., Plummer, C. J. G., Decroly, P. (2001). « Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques », Presses polytechniques et universitaires romandes.

[Khazaei 2020] Khazaei, P., Mohammadimehr, M. (2020). « Vibration analysis of porous nanocomposite viscoelastic plate reinforced by FG-SWCNTs based on a nonlocal strain gradient theory», Computers and Concrete, 26(1), 31-52.

[Khiloun 2020] Khiloun, M., Bousahla, A. A., Kaci, A., Bessaim, A., Tounsi, A., & Mahmoud, S. R. (2020). « Analytical modeling of bending and vibration of thick advanced composite plates using a four-variable quasi 3D HSDT », Engineering with Computers, 36(3).

[Kiani 2016] Kiani, Y. (2016), « Shear buckling of FG-CNT reinforced composite plates using Chebyshev-Ritz method», Composites Part B: Engineering., 105, 176-187.

[Kiani 2017] Kiani, Y. (2017), «Thermal buckling of temperature-dependent FG-CNT-reinforced composite skew plates», Journal of Thermal Stresses., 40(11), 1442-1460.

[Kiani 2019] Kiani, Y., &Mirzaei, M. (2019), "Isogeometric thermal postbuckling of FG-GPLRC laminated plates", Steel and Composite Structures., **32**(6), 821–832.

[Kim 2001] Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., & McEuen, P. L. (2001). « Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes », Physical review letters, 87(21), 215502.

[Kim 2007] Kim, J. Y., Park, H. S., & Kim, S. H. (2007). « Multiwall-carbon-nanotube-reinforced poly (ethylene terephthalate) nanocomposites by melt compounding», Journal of applied polymer science, 103(3), 1450-1457.

[Kim 2009] Kim, S.E., Thai, H.T. and Lee, J., (2009). « Buckling analysis of plates using the two variable refined plate theory », 47(4), 455–462.

[Kirchhoff 1850] Kirchhoff, G.R., (1850). « Uber das Gleichgewicht und die Bewegung einer Elastischen Scheibe », J. Reine Angew. Math. (Crelle).

[Kociak 2001] Kociak, M., Kasumov, A. Y., Guéron, S., Reulet, B., Khodos, I. I., Gorbatov, Y. B., ... & Bouchiat, H. (2001). « Superconductivity in ropes of single-walled carbon nanotubes», Physical review letters, 86(11), 2416.

[Komarov 2004] Komarov, F. F., & Mironov, A. M. (2004). « Carbon nanotubes: present and future», Phys. Chem. Solid State, 5(3), 411-429.

[Krätschmer 1990] Krätschmer, W., Lamb, L. D., Fostiropoulos, K. H. D. R., & Huffman, D. R. (1990). « Solid C60: a new form of carbon», Nature, 347(6291), 354-358.

[Kroto 1985] Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. (1985). « C60: Buckminsterfullerene», nature, 318(6042), 162-163.

L

[Lambin 1994] Lambin, P., Philippe, L., Charlier, J. C., & Michenaud, J. P. (1994). « Electronic band sructure of multilayered carbon tubules », Computational Materials Science, 2(2), 350-356.

[Lasmi 2014] Lasmi, S. (2014). « Effets des taux de l'agent traitant et de l'agent compatibilisant sur les propriétés des nanocomposites Polypropylène /Silice », thèse de Magister, l'Université SETIF-1.

[Lassagne 2006] Lassagne, B. (2006). « Transport électronique dans les nanotubes de carbone : étude sous champ magnétique », thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[Lau 2004] Lau, K.T., Gu, C., GH, Ling H.Y., Reid, S.R. (2004), «Stretching process of single- and multiwalled carbon nanotubes for nanocomposite applications», Carbon.,42(426), 8.

[Lee 2008] Lee, S. H., Kim, M. W., Kim, S. H., & Youn, J. R. (2008). « Rheological and electrical properties of polypropylene/MWCNT composites prepared with MWCNT masterbatch chips», European polymer journal, 44(6), 1620-1630.

[Lee 2020] Lee, H., Yu, W., Loh, K. J., and Chung, W. (2020). « Self-heating and Electrical Performance of Carbon Nanotube-Enhanced Cement Composites ». Construction Building Mater. 250, 118838.

[Li 2007a] Li, J., & Kim, J. K. (2007). « Percolation threshold of conducting polymer composites containing 3D randomly distributed graphite nanoplatelets », Composites science and technology, 67(10), 2114-2120.

[Li 2007b] Li, J., Ma, P. C., Chow, W. S., To, C. K., Tang, B. Z., & Kim, J. K. (2007). « Correlations between percolation threshold, dispersion state, and aspect ratio of carbon nanotubes», Advanced Functional Materials, 17(16), 3207-3215.

[Li 2009] Li, Q., Liu, C., Wang, X., & Fan, S. (2009). «Measuring the thermal conductivity of individual carbon nanotubes by the Raman shift method», Nanotechnology, 20(14), 145702.

[Liu 1998] Liu, J., Rinzler, A. G., Dai, H., Hafner, J. H., Bradley, R. K., Boul, P. J., ... & Smalley,

R. E. (1998). « Fullerene pipes», Science, 280(5367), 1253-1256.

[Liu 1999] C Liu, C., Fan, Y. Y., Liu, M., Cong, H. T., Cheng, H. M., & Dresselhaus, M. S. (1999). « Hydrogen storage in single-walled carbon nanotubes at room temperature», Science, 286(5442), 1127-1129.

[Liu 2009] Liu, Y. Q., Cong, H. T., Wang, W., Sun, C. H., & Cheng, H. M. (2009). « AlN nanoparticle-reinforced nanocrystalline Al matrix composites: Fabrication and mechanical properties», Materials Science and Engineering: A, 505(1-2), 151-156.

[Liu 2012] Liu, J., Xue, Y., Zhang, M., & Dai, L. (2012). « Graphene-based materials for energy applications», MRS bulletin, 37(12), 1265-1272.

[Love 1888] Love, A.E.H., (1888). « On the small free vibrations and deformations of elastic shells », London: Philosophical trans. of the Royal Society.

[Love 1927] Love, A. E. H. (1927). « A treatise on the mathematical theory of elasticity ». Cambridge University Press, Cambridge, 4th edition edition.

[Lu 1997] Lu, J. (1997). « Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes ». Phys Rev Lett, 79,1297–300.

[Lu 2010] Lu, W., Chou, T. W., & Thostenson, E. T. (2010). « A three-dimensional model of electrical percolation thresholds in carbon nanotube-based composites », Applied Physics Letters, 96(22).

M

[Maachou 2011] Maachou, M., Zidour, M., Baghdadi, H., Ziane, N., & Tounsi, A. (2011). « A nonlocal Levinson beam model for free vibration analysis of zigzag single-walled carbon nanotubes including thermal effects », Solid State Communications, 151(20), 1467-1471.

[Mahi 2015] Mahi, A., & Tounsi, A. (2015). « A new hyperbolic shear deformation theory for bending and free vibration analysis of isotropic, functionally graded, sandwich and laminated composite plates», Applied mathematical modelling, 39(9), 2489-2508.

[Mallek 2019] Mallek, H., Jrad, H., Algahtani, A., Wali, M., &Dammak, F. (2019), « Geometrically non-linear analysis of FG-CNTRC shell structures with surface-bonded piezoelectric layers», Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.,347, 679-699.

[Mantari 2014] Mantari, J. L., Granados, E. V., Hinostroza, M. A., & Soares, C. G. (2014). « Modelling advanced composite plates resting on elastic foundation by using a quasi-3D hybrid type HSDT », Composite Structures, 118, 455-471.

[Marcoux 2002] Marcoux, P. (2002). « Réactivité et manipulation de nanotubes de carbone monocouches : fonctionnalisation de surface par greffage covalent et mise en oeuvre comme agent structuran »t, thèse de doctorat, Université d'Angers.

[Marquis 2011] D. M. Marquis, E. Guillaume, C. Chivas-Joly. « Properties of nano-fillers in polymer », In:J. Cuppoletti, Nanocomposites and polymers with analytical methods, Rijeka, Croatia, InTech, 261-284,(2011)

[Mars 2017] Mars, J., Koubaa, S., Wali, M., &Dammak, F. (2017), « Numerical Analysis of Geometrically Non-Linear Behavior of Functionally Graded Shells», Latin American Journal of Solids and Structures.,14(11), 1952–1978.

[Matsunaga 2009] Matsunaga, H. (2009). « Stress analysis of functionally graded plates subjected to thermal and mechanical loadings ». Compos. Struct. 87(4), 344–357.

[Mehar 2017] Mehar, K., Panda, S.K. (2017), « Thermoelastic analysis of FG-CNT reinforced shear deformable composite plate under various loading», International Journal of Computational Methods., **14**(2), 1750019.

[Mehar 2020] Mehar, K., Panda, S.K., Sharma, N. (2020). « Numerical investigation and

experimental verification of thermal frequency of carbon nanotube-reinforced sandwich structure», Engineering Structures., **211.**

[Meksi 2018] Meksi, R, Benyoucef, S., Mahmoudi, A., Tounsi, A., Adda Bedia, E.A. and Mahmoud, SR.(2018). « An analytical solution for bending, buckling and vibration responses of FGM sandwich plates », J. Sandw . Struct.Mater., 1099636217698443.

[Mindlin 1951] Mindlin, R., Mar. (1951). « Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic », elastic plates. Journal of Applied Mechanics.18:31–38.

[Mintmire 1993] Mintmire, J. W., Robertson, D. H., & White, C. T. (1993). « Properties of fullerene nanotubules», Journal of Physics and Chemistry of Solids, 54(12), 1835-1840.

[Moniruzzaman 2006] Moniruzzaman, M., & Winey, K. I. (2006). « Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes », Macromolecules, 39, 5194.

[Motezaker 2020] Motezaker, M., Eyvazian, A. (2020). « Post-buckling analysis of Mindlin Cut out-plate reinforced by FG-CNTs», Steel and Composite Structures, 34(2), 289-297.

[Muller 2005] Muller, J., Huaux, F., Moreau, N., Misson, P., Heilier, J. F., Delos, M., ... & Lison, D. (2005). « Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes. Toxicology and applied pharmacology», 207(3), 221-231.

N

[Naceri 2011] Naceri, M., Zidour, M., Semmah, A., Houari, M. S. A., Benzair, A., & Tounsi, A. (2011). « Sound wave propagation in armchair single walled carbon nanotubes under thermal environment», Journal of applied physics, 110(12).

[Nicole 2005] Boaen, N. K., & Hillmyer, M. A. (2005). « Post-polymerization functionalization of polyolefins», Chemical Society Reviews, 34(3), 267-275.

[Nikolaev 1999] Nikolaev, P., Bronikowski, M. J., Bradley, R. K., Rohmund, F., Colbert, D. T., Smith, K. A., & Smalley, R. E. (1999). « Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide», Chemical physics letters, 313(1-2), 91-97.

[Nitta 1999] Nitta, K. H., & Takayanagi, M. (1999). « Role of tie molecules in the yielding deformation of isotactic polypropylene», Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 37(4), 357-368.

O

[Obaje 2013] Obaje, S. O., Omada, J. I., & Dambatta, U. A. (2013). « Clays and their industrial applications: Synoptic Review», International Journal of Science and Technology, 3(5), 264-270.

[Oudet 1993] Oudet, C. (1993). « Polymères: Structure et propriétés: Introduction », Editor MASSON.

[Overney 1993] Overney, G., Zhong, W., & Tomanek, D. (1993). « Structural rigidity and low frequency vibrational modes of long carbon tubules», Zeitschrift für Physik D Atoms, Molecules and Clusters, 27, 93-96.

P

[Palkovits 2005] Palkovits, R., Althues, H., Rumplecker, A., Tesche, B., Dreier, A., Holle, U., ... & Kaskel, S. (2005). « Polymerization of w/o microemulsions for the preparation of transparent SiO2/PMMA nanocomposites», Langmuir, 21(13), 6048-6053.

[Panc 1975] Panc, V. (1975). «Theories of elastic plates (Vol. 2) », Springer Science & Business Media.

[Paris 2011] Paris, C. (2011). « Étude et Modélisation de la Polymérisation Dynamique de Composites à Matrice Thermodurcissable », thèse de doctorat, Université de Toulouse.

[Paul 2008] Paul, D. R., Robeson, L. M., (2008) « La nanotechnologie polymère, en nanocomposites », 49, 3187-3204.

[Peeterbroeck 2004] Peeterbroeck, S., Alexandre, M., Nagy, J. B., Pirlot, C., Fonseca, A., Moreau, N., ... & Dubois, P. (2004). « Polymer-layered silicate–carbon nanotube nanocomposites: unique nanofiller synergistic effect», Composites Science and Technology, 64(15), 2317-2323.

[Penu 2008] Penu, C. (2008). « Nanocomposites à matrice polyamide 6 ou polystyrène et à renforts de nanotubes de carbone : Du procédé de synthèse aux phénomènes de percolation », Thèse de doctorat, Université de Lorraine.

[Pop 2006] Pop, E., Mann, D., Wang, Q., Goodson, K., & Dai, H. (2006). « Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature», Nano letters, 6(1), 96-100.

[Pötschke 2002] Pötschke, P., Fornes, T. D., & Paul, D. R. (2002). « Rheological behavior of multiwalled carbon nanotube/polycarbonate composites», Polymer, 43(11), 3247-3255.

Q

[Qian 2000] Qian, D., Dickey, E. C., Andrews, R., & Rantell, T. (2000). « Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites », Appl. Phys. Lett, 76, 2868-2870.

R

[Rahmani 2020] Rahmani, M. C., Kaci, A., Bousahla, A. A., Bourada, F., Tounsi, A., Bedia, E. A., ... & Tounsi, A. (2019). « Influence of boundary conditions on the bending and free vibration behavior of FGM sandwich plates using a four-unknown refined integral plate theory», Computers and Concrete, An International Journal, 27(2), 225-244.

[Rahmatnezhad 2021] Rahmatnezhad, K., Zarastvand, M. R., & Talebitooti, R. (2021). « Mechanism study and power transmission feature of acoustically stimulated and thermally loaded composite shell structures with double curvature», Composite Structures, 276, 114557.

[Rayleigh 1945] Rayleigh, L., (1945). « Theory of sound », Dover Pub.

[Rebai 2021] Rebai, B., Bouhadra, A., Bousahla, A. A., Meradjah, M., Bourada, F., Tounsi, A., ... & Hussain, M. (2021). « Thermoelastic response of functionally graded sandwich plates using a simple integral HSDT», Archive of Applied Mechanics, 91(7), 3403-3420.

[Reddy 1984] Reddy, J.N. (1984). « A simple higher-order theory for laminated composite plates ». J Appl Mech; 51:745–52.

[Reddy 1997] Reddy, J.N. (1997). « Mechanics of Laminated Composites Plates: Theory and Analysis ». CRC Press, Boca Raton.

[Reissner 1945] Reissner, E., (1945). « The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates », Journal of Applied Mechanics-transactions of The ASME, 69–77.

[Reissner 1975] Reissner E. (1975). « On transverse bending of plates, including the effect of transverse shear deformation», Int J Solids Struct, 11(5), 569–73.

[Ren 1998] Ren, Z. F., Huang, Z., Xu, J. W., Wang, J. H., Bush, P., Siegal, M. P., & Provencio, P. N. (1998). « Synthesis of large arrays of well-aligned carbon nanotubes on glass», Science, 282(5391), 1105-1107.

[Rezaiee-Pajand 2019] Rezaiee-Pajand, M., Mokhtari, M., & Hozhabrossadati, S. M. (2019). « Application of Hencky bar-chain model to buckling analysis of elastically restrained

Timoshenko axially functionally graded carbon nanotube reinforced composite beams», Mechanics Based Design of Structures and Machines., 1–22.

[Ricaud 2008] Ricaud, M., Lafon, F. R. D., (2008) « Les nanotubes de carbone : quels risques, quelle prévention? », INRS-Cahiers de notes documentaires ND 2286-210-08, 210, 43.

[Rinzler 1995] Rinzler, A.G., Hafner, J.H., Nikolaev, P., Lou, L., Kim, S.G., Tománek, D., Nordlander, P., Colbert, D.T., Smalley, R.E., (1995). « Unraveling Nanotubes: Field Emission from an Atomic Wire », Science, 269, 1550.

[Rinzler 1998] Rinzler, A. G., Liu, J., Dai, H., Nikolaev, P., Huffman, C. B., Rodriguez-Macias, F. J., ... & Smalley, R. E. (1998). « Large-scale purification of single-wall carbon nanotubes: Process, product, and characterization», Applied Physics A: Materials Science & Processing, 67(1).

[Rizk 2009] Rizk, S. (2009). « Elaboration et caractérisation de nanostructures carbonées par procède CVD assiste par plasma microonde ».

S

[Sabzevari 2016] Sabzevari, M., Sajjadi, S.A., Moloodi, A., (2016). « Propriétés physiques et mécaniques du cuivre nanocomposite porus, produit par la métallurgie des poudres », 27, 105-111.

[Sahoo 2013] Sahoo, R., Singh, B.N., (2013). « A new shear deformation theory for the static analysis of laminated composite and sandwich plates », International Journal of Mechanical Sciences, 75, 324-336.

[Saint-aubin 2010] Saint-aubin, K. (2010). « Etude de dispersions de nanotubes de carbone par des polymères pour l'élaboration de composites conducteurs et structurés », thèse de doctorat, l'Université Bordeaux I.

[Saito 1998] Saito, R., Dresselhaus, G., Dresselhaus, M. S., (1998). « Physical Properties of Carbon Nanotubes ». Imperial College Press.

[Sander 1998] Tans, S. J., Verschueren, A. R., & Dekker, C. (1998). « Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube», Nature, 393(6680), 49-52.

[Schadler 1998] Schadler, L. S, Giannaris, S. C, & Ajayan, P. M. (1998). « Load transfer in carbon nanotubeepoxy composites », Appl. Phys. Lett.,73, 3842-3844.

[Shahsavari 2017] Shahsavari, D. and Janghorban, M. (2017). « Bending and shearing responses for dynamic analysis of single-layer graphene sheets under moving load », Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39(10).

[Shahsavari 2018] Shahsavari, D., Shahsavari, M., Li, L., & Karami, B. (2018). « A novel quasi-3D hyperbolic theory for free vibration of FG plates with porosities resting on Winkler/Pasternak/Kerr foundation», Aerospace Science and Technology, 72, 134-149.

[**Shi 1999**] Shi, Z.J., Lian, Y.F., Zhou, X.H., Gu Z.N., Zhang, Y.G., Iijima, S., Zhou, L.X., Yue, K.T., Zhang, S.L. (1999). « Mass-production of single-wall carbon nanotubes by arc discharge method », Carbon, 37, 1449.

[Shimpi 2002] Shimpi, R.P., (2002). « Refined plate theory and its variants », AIAA Journal, 137–146.

[Si Tayeb 2020] Si Tayeb, T., Zidour, M., Bensattalah, T., Heireche, H., Benahmed, A., & Bedia, E. A. (2020). « Mechanical buckling of FG-CNTs reinforced composite plate with parabolic distribution using Hamilton's energy principle», Advances in nano research, 8(2), 135-148.

[Si Tayeb 2021] Si Tayeb.T, (2021). « Analyse du comportement mécanique des nano- composites à base de nanotubes de carbone », thèse de doctorat, Université de Sidi Bel Abess, Algérie.

[Thess 1996] Thess, A., Lee, R., Nikolaev, P., Dai, H., Petit, P., Robert, J., ... & Smalley, R. E.

(1996). « Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes», science, 273(5274), 483-487.

[Smith 1998] Smith, B. W., Monthioux, M., & Luzzi, D. E. (1998). « Encapsulated C60 in carbon nanotubes», Nature, 396(6709), 323-324.

[Soldatos 1992] Soldatos, K. P. (1992). « A transverse shear deformation theory for homogeneous monoclinic plates », Acta Mechanica, 94(3-4), 195-220.

[Soldatos 1993] Soldatos, K. P. and Timarci, T. (1993). « A unified formulation of laminated composite, shear deformable, fivedegrees- of-freedom cylindrical shell theories », Composite Structures, 25, 165–171.

[Stones 1986] Stone, A. J., & Wales, D. J. (1986). « Theoretical studies of icosahedral C60 and some related species», Chemical Physics Letters, 128(5-6), 501-503.

[Suenaga1 2000] Suenaga, K., Tence, M., Mory, C., Colliex, C., Kato, H., Okazaki, T., ... & Iijima, S. (2000). « Element-selective single atom imaging», Science, 290(5500), 2280-2282.

[Suenaga1 2001] Suenaga, K., Sandré, E., Colliex, C., Pickard, C. J., Kataura, H., & Iijima, S. (2001). « Electron energy-loss spectroscopy of electron states in isolated carbon nanostructures», Physical Review B, 63(16), 165408.

[Sweeney 2017] Sweeney, C. B., Lackey, B. A., Pospisil, M. J., Achee, T. C., Hicks, V. K., Moran, A. G.,. Teipel, R.B., Saed, A.M. Green, M. J. (2017). « Welding of 3D-printed carbon nanotube–polymer composites by locally induced microwave heating», Science Advances., 3(6), e1700262.

T

[Tans 1997] Tans, S. J., Devoret, M. H., Dai, H., Thess, A., Smalley, R. E., Geerligs, L. J., & Dekker, C. (1997). « Individual single-wall carbon nanotubes as quantum wires», Nature, 386(6624), 474-477.

[Thai 2011] Thai, H.-T. and Kim, S.-E., (2011). « Levy-type solution for buckling analysis of orthotropic plates based on two variable refined plate theory », Composite Structures, 1738–1746.

[Thai 2013] Thai, H. T. and Kim, S. E. (2013). « A simple quasi-3D sinusoidal shear deformation theory for functionally graded plates », Composite Structures, 99.

[Taipale 2010] Taipale, T., Österberg, M., Nykänen, A., Ruokolainen, J., Laine, J. (2010). « Effect of Microfibrillated Cellulose and Fines on the Drainage of Kraft Pulp Suspension and Paper Strength », Cellulose, 17, 1005–1020.

[Thostenson 2001] Thostenson, E. T., Ren, Z., & Chou, T.-W. (2001). «Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review», Composites Science and Technology., 61(13), 1899–1912.

[Timesli 2020] Timesli, A. (2020), «Prediction of the critical buckling load of SWCNT reinforced concrete cylindrical shell embedded in an elastic foundation», Computers and Concrete., 26(1), 53-62.

[Timoshenko 1921] Timoshenko, S., (1921). « On the correction of transverse shear deformation of the differential equations for transverse vibrations of prismatic bars », Philosophical Magazine, 41 (series 46).

[FRECHET 2001] FRECHET, J. M., & TOMALIA, D. A. (2001). Dendrimers and Other Dendritic Polymers.

[Tounsi 2013] Tounsi, A., Houari, M.S.A., Benyoucef, S., and Adda Bedia, E.A. (2013). « A refined trigonometric shear deformation theory for thermoelastic bending of functionally graded sandwich plates», Aerosp. Sci. Technol., 24(1), 209- 220.

[Touratier 1991] Touratier, M. (1991). « An efficient standard plate theory», International Journal

of Engineering Science, 29(8), 901-916.

U

[Uddin 2008] F. Uddin, (2008). « Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals », Metallurgical and Materials Transactions A,39(12), 2804-2814.

[Uflyand 1948] Uflyand, Y.S., (1948). « The propagation of waves in the transverse vibrations of bars and plates », 12, 287–300.

V

[Vaccarini 1999] Vaccarini, L., Goze, C., Aznar, R., Micholet, V., Journet, C., & Dernier, P. (1999). « Purification procedure of carbon nanotubes», Synthetic Metals, 103(1-3), 2492-2493.

[Velasco 2003] Velasco-Santos, C., Martinez-Hernandez. A. L., Fisher. F. T., Ruoff, R., & Castano, V. M., (2003). « Improvement of thermal and mechanical properties of carbon nanotubecomposites through chemical functionalization », Chem. Mater., 15, 4470- 4475.

[Vigolo 2000] Vigolo, B., Penicaud, A., Coulon, C., Sauder, C., Pailler, R., Journet, C., ... & Poulin, P. (2000). « Macroscopic fibers and ribbons of oriented carbon nanotubes», Science, 290(5495), 1331-1334.

[Vinyas 2020] Vinyas, M. (2020). « On frequency response of porous functionally graded magneto-electro-elastic circular and annular plates with different electro-magnetic conditions using HSDT », Compos. Struct. 240, 112044.

[Vivien 1999] Vivien, L., Anglaret, E., Riehl, D., Bacou, F., Journet, C., Goze, C., ... & Hache, F. (1999). « Single-wall carbon nanotubes for optical limiting», Chemical Physics Letters, 307(5-6), 317-319.

[Vodenitcharova 2003] Vodenitcharova, T., and Zhang, L.C., (2003). « Effective wall thickness of a single-walled carbon nanotube», *Phys. Rev. B*, 68, 165401.

[Von Kármán 1910] Von Kármán, T. (1910). « Festigkeitsproblem im Maschinenbau», Encyk. D. Math. Wiss. IV, 311–385

W

[Wang 2003] Wang, J., & Musameh, M. (2003). « Carbon nanotube/teflon composite electrochemical sensors and biosensors», Analytical chemistry, 75(9), 2075-2079.

[Web1 2023] https://v-mr.biz/fr/carbon-nanotubes-market-503

[Web2 2022] https://www.gabonflash.com/2022/08/10/nanotubes-de-carbonecnt masterbatches-progres-du-marche-2022/.

[Web3 2021] https://lbe.news/marche-nanotubes-de-carbone-cnt-par-principaux-acteurs-regions-tendances-opportunites-et-previsions-2028-androidfun-fr/.

[web4 2009] https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/84-elastomere.

[Wei 2001] Wei, B. Q., Vajtai, R., & Ajayan, P. M. (2001). « Reliability and current carrying capacity of carbon nanotubes», Applied physics letters, 79(8), 1172-1174.

[Whitney 1973] Whitney, J. M. (1973). «Shear correction factors for orthotropic laminates under static load», 40, 302–304.

[Wick 2007] Wick, P., Manser, P., Limbach, L. K., Dettlaff-Weglikowska, U., Krumeich, F., Roth,

S., ... & Bruinink, A. (2007). « The degree and kind of agglomeration affect carbon nanotube cytotoxicity », Toxicology letters, 168(2), 121-131.

[Wong 2001] Wong, Y. W., Lo, K. L., & Shin, F. G. (2001). « Electrical and thermal properties of composite of liquid crystalline polymer filled with carbon black», Journal of applied polymer science, 82(6), 1549-1555.

X

[Xiang 2009] Xiang, S., Wang, K. M., Ai, Y. T., Sha, Y. D., & Shi, H. (2009). « Analysis of isotropic, sandwich and laminated plates by a meshless method and various shear deformation theories», Composite Structures, 91(1), 31-37.

[Xiao 2007] Xiao, K. Q., Zhang, L. C., & Zarudi, I. (2007). « Mechanical and rheological properties of carbon nanotube-reinforced polyethylene composites», Composites Science and Technology, 67(2), 177-182.

[Xing 2016] Xing, W., Yang, W., Yang, W., Hu, Q., Si, J., Lu, H., et al. (2016). « Functionalized Carbon Nanotubes with Phosphorus- and Nitrogen-Containing Agents: Effective Reinforcer for thermal », Mechanical, and Flame-Retardant Properties of Polystyrene Nanocomposites. ACS Appl. Mater. Inter. 8,26266–26274.

[Xu 2001] Xu, J. M., (2001). « Highly ordered carbon nanotubes arrays and IR detection », Infrared Physics & Technology, 42, 485-491.

Y

[Yakobson 1996] Yakobson, B. I., Brabec, C. J., and Bernholc, J. (1996). « Structural mechanics of carbon nanotubes: from continuum elasticity to atomistic fracture ». Journal of Computer-Aided Materials Design, 3(1), 173-182.

[Yakobson 2001] Yakobson, B. and Avouris, Ph. (2001). « Topics in Applied Physics », 80, 287.

[Yamamoto 2014] Yamamoto, G., Shirasu, K., Nozaka, Y., Sato, Y., Takagi, T., & Hashida, T. (2014). « Structure–property relationships in thermally-annealed multi-walled carbon nanotubes», Carbon, 66, 219-226.

[Yang **2004]** Yang, D. J., Wang, S. G., Zhang, Q., Sellin, P. J., & Chen, G. (2004). « Thermal and electrical transport in multi-walled carbon nanotubes», Physics Letters A, 329(3), 207-213.

[Yıldırım 2018] Yıldırım, G., Sarwary, M. H., Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Anıl, Ö., and Şahmaran, M. (2018). « Piezoresistive Behavior of CF- and CNT-Based Reinforced concrete Beams Subjected to Static Flexural Loading: Shear Failure Investigation », Construction Building Mater. 168, 266–279.

[Yıldırım 2020] Yıldırım, G., Öztürk, O., Al-Dahawi, A., Afşın Ulu, A., and Şahmaran, M. (2020). « Self-sensing Capability of Engineered Cementitious Composites: Effects of Aging and Loading Conditions », Construction Building Mater. 231, 117132.

[Yoo, 2017] Yoo, D.-Y., You, I., and Lee, S.-J. (2017). « Electrical Properties of Cement-Based Composites with Carbon Nanotubes, Graphene, and Graphite Nanofibers », Sensors 17, 1064.

[Young 2011] R. J. Young & P. A. Lovell, (2011). « Introduction to polymers » Third edition, CRC Press Taylor & Francis Group.

[Yu 2000] Yu, M. F., Files, B. S., Arepalli, S., & Ruoff, R. S. (2000). «Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties», Physical review letters, 84(24), 5552.

[Yudaska 2000] Yudasaka, M., Iijima, S., & Crespi, V. H. (2008). « Single-wall carbon nanohorns and nanocones», Carbon nanotubes: Advanced topics in the synthesis, structure, properties and

applications, 605-629.

Z

[Zaoui 2020] Zaoui, F.Z., Tounsi, A.; Ouinas, D., Olayet, J.A.V. (2020) « A Refined HSDT for Bending and Dynamic Analysis of FGM Plates », Struct. Eng. Mech., 74, 105–119.

[Zerrouki 2020] Zerrouki, R., Karas, A., & Zidour, M. (2020), « Critical buckling analyses of nonlinear FG-CNT reinforced nano-composite beam», Advances in nano research, 9(3), 211-220.

[Zghal 2018] Zghal, S., Frikha, A., & Dammak, F. (2018), « Non-linear bending analysis of nanocomposites reinforced by graphene-nanotubes with finite shell element and membrane enhancement», Engineering Structures., 158, 95–109.

[Zhang 2006] Zhang, Q., Rastogi, S., Chen, D., Lippits, D., & Lemstra, P. J. (2006). « Low percolation threshold in single-walled carbon nanotube/high density polyethylene composites prepared by melt processing technique», Carbon, 44(4), 778-785.

[Zhong 2018] Zhong, R., Wang, Q., Tang, J., Shuai, C., & Qin, B. (2018), «Vibration analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composites (FG-CNTRC) circular, annular and sector plates», Composite Structures, 194, 49–67.

[Zidour 2011] Zidour, M., Benrahou, K. H., Semmah, A., Naceri, M., Belhadj, H. A., Bakhti, K., & Tounsi, A. (2012). « The thermal effect on vibration of zigzag single walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory», Computational materials science, 51(1), 252-260.

[Zidour 2012] M. Zidour, (2012). « Etude du comportement mécanique des nanotubes en carbone entourés par une matrice polymère », thèse de doctorat, Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbes.

[Zidi 2014] Zidi, M., Tounsi, A., Houari, M. S. A., & Bég, O. A. (2014). « Bending analysis of FGM plates under hygro-thermo-mechanical loading using a four variable refined plate theory», Aerospace Science and Technology, 34, 24-34.

[Zine 2020] Jiang, H., Feng, J., Xiao, J., Chen, M., & Liang, W. (2020). « Shear strength of match-cast-free dry joint in precast girders», Computers and Concrete, An International Journal, 26(2), 161-173.